

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KOMPARACE AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ KYTAR ZE STEJNÉ VÝROBNÍ ŘADY

THE COMPARISON OF ACOUSTIC PROPERTIES OF GUITARS FROM THE SAME PRODUCT LINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hana Trávníčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Studentka: Hana Trávníčková

ID: 200886

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Komparace akustických vlastností kytar ze stejné výrobní řady

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Změřte a vyhodnoťte vybrané tóny hrané na nejméně tři kytary se stejné výrobní řady. Tóny mohou být hrány hudebníkem co nejvíce podobným drknutím, ideálně pak robotem. Vybrané tóny budou hrány se zcela zatlumeným rezonátorem (tělem) kytary a plně odkrytým. Dále u vybraných tónů proveďte analýzu Chladniho obrazců. Vyhodnoťte barvu generovanou v různé dynamice s módy/obrazci na horní rezonanční desce. Porovnejte spektra - zastoupení harmonických i neharmonických složek, jejich intenzitu i odeznívání. Identifikujte a porovnejte formantové oblasti. Rovněž porovnejte směrové vyzařování nástrojů. Výstupem budou komparační tabulky spekter s módy rezonátoru, zvláště porovnání 1. až 8. harmonické složky v prvním pásmu, porovnání intenzit lichých a sudých složek, srovnání center a rozpětí formantových oblastí. Porovnejte i laloky ve směrových grafech. Dejte získaná data do souvislosti s parametry a mechanickými rozdíly mezi jednotlivými nástroji (hmotnost, módy) s psychoakustickými veličinami při vnímání barvy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] Geist, B.: Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce pojednává o akustických vlastnostech kytar Furch. V teoretickém úvodu nalezneme informace o základních vlastnostech tónu. Následuje kapitola o akustických kytarách, ve které jsou uvedeny i nejpoužívanější dřeva pro jejich výrobu. Ve speciální kapitole jsou popsány spektra signálu, LPC analýza, směrové vyzařování nástrojů a Chladniho obrazce. Zmíněné pojmy byly z měření vyhodnoceny a najdeme je v praktické části této práce spolu s popisem realizace měření. Výstupem práce je porovnání akustických vlastností měřených kytar, jejich barvy a módů.

Klíčová slova

Akustická kytara, barva zvuku, formant, LPC analýza, módy, rezonance, směrová charakteristika, zvukové spektrum.

Abstract

This work is dealing with acoustic features of Furch guitars. In theoretical introduction is possible to find an information about basic characteristics of a tone. Following chapter about acoustic guitars is dealing even with mostly used types of woods for their manufacturing. In special chapter are described spectres of signals, LPC analysis, sound radiation of instruments and Chladni figures. Mentioned terms have been evaluated from measurements and are available in practical part of this work also including description of implementation of the measurement. As an output of this work is a comparison of acoustic features of measured guitars, their colours and modes.

Keywords

Acoustic guitar, timbre, formant, LPC analysis, modes, resonance, sound radiation, sound spectre.

Bibliografická citace:

TRÁVNÍČKOVÁ, Hana. Komparace akustických vlastností kytar ze stejné výrobní řady. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125871>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Komparace akustických vlastností kytar ze stejné výrobní řady* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 8. června 2020

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné konzultace, pomoc při měření a podnětné návrhy k práci. Také bych chtěla poděkovat doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za pomoc při realizaci měření. Děkuji také přátelům Martinu Šťastovi, Petru Zavadilovi a Vojtovi Košaři za pomoc nejen při měření. V neposlední řadě děkuji také firmě Furch, která mi svěřila svoje kytary.

V Brně dne: 8. června 2020

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod	14
1 Tóny.....	15
1.1 Výška tónu.....	15
1.2 Intenzita.....	15
1.3 Doba trvání.....	16
1.4 Barva	17
2 Akustická kytara	18
2.1 Vznik tónu	18
2.2 Druhy dřev používané pro výrobu	19
3 Zkoumané vlastnosti.....	21
3.1 Spektrum signálu.....	21
3.2 Spektrogram	22
3.3 LPC.....	22
3.4 Směrové vyzařování.....	23
3.5 Chladniho obrazce.....	24
4 Měření.....	26
4.1 Měřené kytary	26
4.2 Podmínky při nahrávání	27
4.3 Měřené tóny, intervaly, akordy	28
4.4 Tlumení	29
4.5 Měření Chladniho obrazců	30
5 Vyhodnocení měření.....	31
5.1 Spektrogramy	32
5.1.1 Tón e – prázdná struna	32
5.1.2 Tón a – 5. poloha	34

5.1.3	Tón g1 – prázdná struna	35
5.1.4	Tón c2 – 5. poloha	36
5.1.5	Tón e2 – prázdná struna	38
5.2	Porovnání FFT	41
5.2.1	Tón e – prázdná struna	41
5.2.2	Tón a – 5. poloha	43
5.2.3	Tón g1 – prázdná struna	44
5.2.4	Tón c2 – 5. poloha	46
5.2.5	Tón e2 – prázdná struna	48
5.3	LPC analýza	50
5.3.1	Tón e – prázdná struna	51
5.3.2	Tón a – 5. poloha	52
5.3.3	Tón g1 – prázdná struna	53
5.3.4	Tón c2 – 5. poloha	54
5.3.5	Tón e2 – prázdná struna	55
5.3.6	Tón g2 – 12. poloha	56
5.3.7	Shrnutí LPC analýzy	56
5.4	Směrové vyzařování	57
5.4.1	Kytara dreadnought	57
5.4.2	Kytara Yellow plus	59
5.4.3	Referenční kytara	61
6	Hledání módů kytar	63
6.1	Referenční kytara	63
6.1.1	Tón e	64
6.1.2	Tón g1	67
6.1.3	Tón e2	70
6.2	Kytara dreadnought	74

6.2.1	Tón e.....	75
6.2.2	Tón g1.....	78
6.2.3	Tón e2.....	79
7	Zhodnocení	83
7.1	Referenční kytara	83
7.2	Kytara Dreadnought	83
7.3	Linková kytara.....	83
8	Závěr.....	84
9	Literatura	85
	Seznam veličin a zkratk	87
	Seznam příloh	88
A.	Obsah přiloženého CD.....	89

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.3:1 ADSR obálka [2].....	16
Obr. 2.1:1 Části akustické kytary [4]	18
Obr. 2.1:2 Žebrování typu X [6].....	19
Obr. 3.2:1 Příklad zobrazení spektrogramu.....	22
Obr. 3.5:1 Chladniho obrazce na desce [10]	24
Obr. 3.5:2 Chladniho obrazce měřené pomocí laseru [11].....	25
Obr. 3.5:1 Rozmístění mikrofونů v bezodrazové komoře	26
Obr. 4.2:1 Měření kytary Dreadnought se zatlumením přední desky	28
Obr. 4.3:1 Hrané tóny a intervaly	28
Obr. 4.3:2 Hrané akordy: (zleva) Em7, A6, F7	29
Obr. 4.4:1 Přibližná místa zatlumení přední desky kytar; vlevo referenční, vpravo Dreadnought	29
Obr. 4.5:1 Měření Chladniho obrazců	30
Obr. 5.1:1 Spektrogramy tónu e, piano	32
Obr. 5.1:2 Spektrogramy tónu e, mezzoforte	33
Obr. 5.1:3 Spektrogramy tónu e, forte.....	33
Obr. 5.1:4 Spektrogramy tónu a, piano	34
Obr. 5.1:5 Spektrogramy tónu a, forte.....	35
Obr. 5.1:6 Spektrogramy tónu g1, piano	35
Obr. 5.1:7 Spektrogramy tónu g1, forte	36
Obr. 5.1:8 Spektrogramy tónu c2, piano	37
Obr. 5.1:9 Spektrogramy tónu c2, mezzoforte	37
Obr. 5.1:10 Spektrogramy tónu c2, forte.....	38
Obr. 5.1:11 Spektrogramy tónu e2, piano	39
Obr. 5.1:12 Spektrogramy tónu e2, mezzoforte	39
Obr. 5.1:13 Spektrogramy tónu e2, forte.....	40
Obr. 5.2:1 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón e.....	41
Obr. 5.2:2 FFT spektrum linkové kytary, tón e.....	42
Obr. 5.2:3 FFT spektrum referenční kytary, tón e.....	42
Obr. 5.2:4 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón a.....	43
Obr. 5.2:5 FFT spektrum linkové kytary, tón a.....	43

Obr. 5.2:6 FFT spektrum referenční kytary, tón a	44
Obr. 5.2:7 Frekvenční spektrum kytary Dreadnought, tón g1	45
Obr. 5.2:8 FFT spektrum linkové kytary, tón g1	45
Obr. 5.2:9 FFT spektrum referenční kytary, tón g1	45
Obr. 5.2:10 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón c2	46
Obr. 5.2:11 FFT spektrum linkové kytary, tón c2	47
Obr. 5.2:12 FFT spektrum referenční kytary, tón c2	47
Obr. 5.2:13 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón e2	48
Obr. 5.2:14 FFT spektrum linkové kytary, tón e2	48
Obr. 5.2:15 FFT spektrum referenční kytary, tón e2	49
Obr. 5.3:1 Porovnání LPC kytar, tón e	51
Obr. 5.3:2 Porovnání LPC kytar, tón a	52
Obr. 5.3:3 Porovnání LPC kytar, tón g1	53
Obr. 5.3:4 Porovnání LPC kytar, tón c2	54
Obr. 5.3:5 Porovnání LPC kytar, tón e2	55
Obr. 5.3:6 Porovnání LPC kytar, tón g2	56
Obr. 5.4:1 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, piano	57
Obr. 5.4:2 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, mezzoforte	58
Obr. 5.4:3 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, forte	58
Obr. 5.4:4 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, piano	59
Obr. 5.4:5 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, mezzoforte	60
Obr. 5.4:6 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, forte	60
Obr. 5.4:7 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, piano	61
Obr. 5.4:8 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, mezzoforte	62
Obr. 5.4:9 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, forte	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 4:1 Vybrané vlastnosti měřených kytar [6][12]	27
Tab. 5:1 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón e.....	42
Tab. 5:2 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón a.....	44
Tab. 5:3 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón g1.....	46
Tab. 5:4 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón c2.....	47
Tab. 5:5 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón e2.....	49
Tab. 5:6 Porovnání formantových oblastí, tón e	51
Tab. 5:7 Porovnání formantových oblastí, tón a	52
Tab. 5:8 Porovnání formantových oblastí, tón g1	53
Tab. 5:9 Porovnání formantových oblastí, tón c2	54
Tab. 5:10 Porovnání formantových oblastí, tón e2	55
Tab. 5:11 Porovnání formantových oblastí, tón g2	56

ÚVOD

Akustická kytara je všestranný hudební nástroj, navíc je každá svými vlastnostmi jedinečná. Práce se zabývá porovnáním vlastností 3 kytar od české značky *Furch Guitars*. Porovnávají se především frekvenční spektra, odeznívání spektrálních složek, dále v práci najdeme LPC analýzu a v neposlední řadě směrové vyzařování nástrojů.

Na začátku práce jsou stručně vysvětleny měřené pojmy, charakteristika vlastností tónů a dočtete se také o akustické kytare – jak vzniká tón, jaké části na akustické kytare hledat a jaká dřeva se nejčastěji používají pro jejich výrobu.

Na teorii navazuje realizace samotného měření. Zde je shrnuto co, jak a kde se měřilo, co vše bylo potřeba při měření dodržovat a popis měřených kytar. Výstupem práce by mimo jiné měla být také identifikace módů kytar. S tím mi pomohlo postupné zatlumování jednotlivých rezonančních částí, které je v této kapitole také popsáno – především čím a na jakých místech se tlumilo.

V poslední části nalezneme jednotlivé grafy s komentáři, u FFT a LPC jsou také přiloženy tabulky s informacemi o harmonických složkách a formantových oblastech. Spektrogramy a směrovosti jsou porovnány ve třech dynamikách. U identifikace módů kytar nalezneme kromě LPC analýzy také výsledky měření Chladniho obrazců. Porovnávají se zde i spektra tlumené a netlumené kytary.

V závěru práce jsou shrnuty naměřené vlastnosti jednotlivých kytar, jejich podobnosti a rozdíly.

1 TÓNY

Pod pojmem tón rozumíme zvuk, jenž má pravidelný, periodický průběh. Také je označován jako zvuk hudební. Nejjednodušším příkladem je sinusový tón (v hudbě přirozený). Může být uměle vygenerován generátorem nebo přehrán ladičkou. Nejpodobnější jsou tóny flétny a varhan. Většina tónů má složitější průběh, jedná se o tóny složené, které můžeme popsat vztahem

$$f(t) = \sum a_n \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot f + \phi_n) \cdot t . \quad (1.1)$$

Pomocí Fourierovy transformace můžeme každý periodický signál rozložit na jednotlivé složky, tzv. harmonické. Zobrazením frekvenčního spektra signálu vidíme jednotlivé harmonické složky – jejich frekvence a intenzity.

Pro každý tón jsou charakteristické 4 vlastnosti – výška, intenzita, délka, barva.

1.1 Výška tónu

Výšku tónu udává jeho frekvence. Hovoříme o absolutní výšce tónu. Tóny s vyšší frekvencí vnímáme jako vyšší a tóny s nižší frekvencí jako nižší. Lidské ucho slyší zvuky (tóny) v rozmezí od 16 Hz do 16 kHz. Dále pak byla zavedena relativní výška tónu neboli poměrná. Jedná se o poměr frekvencí vnímaného a základního tónu. V hudební praxi byl stanoven základní tón o frekvenci 440 Hz označovaný jako komorní *a*. V technické praxi se setkáme s referenčním tónem 1kHz (tón b2/c3).

1.2 Intenzita

Intenzitu můžeme chápat z fyzikálního hlediska jako akustický výkon postupné vlny na jednotku plochy. Je dána vztahem

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} = \frac{W}{S \cdot t} , \quad (1.2)$$

kde *P* je akustický výkon (N) a *S* plocha v prostředí, kterou projde akustická energie *W*. Čím větší je energie dodaná na vytvoření tónu, tím vyšší je amplituda a tím pádem i tělesem předávaná energie do okolí větší [1].

1.3 Doba trvání

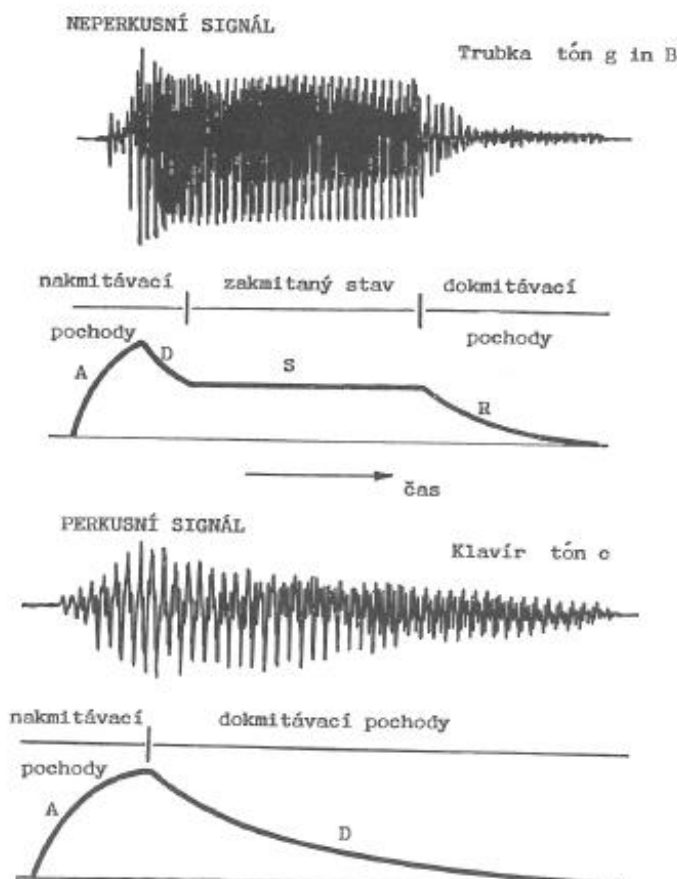
Délka tónu je závislá na množství energie, kterou je pružné těleso rozkmitáno, dobou, po kterou mu je energie předávána, materiálu pružného tělesa a pružnosti prostředí.

V časovém průběhu můžeme rozlišit cca 3 stadia:

- 1) nakmitávací, tzv. tranzientní;
- 2) stadium kmitů (kmitání);
- 3) dokmitávací.

U různých hudebních nástrojů se stadia svojí délkou liší. Společným znakem je, že v prvním a třetím stadiu se mění velikost amplitudy tónu.

U perkusních nástrojů v časových obálkách vidíme jen nakmitávací a dokmitávací fázi. U perkusních nástrojů můžeme vidět ADSR obálku. Jednotlivé části, jak je můžeme vidět i na obr. 1.3:1, jsou attack – náběh, decay – útlum, sustain – podržení, release – uvolnění. Např. u kytary fáze náběhu je drnknutí na strunu, útlum je pokles na ustálenou hodnotu, která po nějakou dobu zůstává, tedy fáze podržení a fáze uvolnění je odeznívání tónu.



Obr. 1.3:1 ADSR obálka [2]

1.4 Barva

Barva tónu je charakteristická pro každý hudební nástroj i lidský hlas. Díky ní od sebe odlišíme různé nástroje hrající stejný tón. Je dána jeho harmonickými složkami – jejich počtem a intenzitou. U hudebních nástrojů ji dotváří doprovodné zvuky vzniku tónu, např. zvuk trsátka na struně, nebo rozkmitání struny smyčcem.

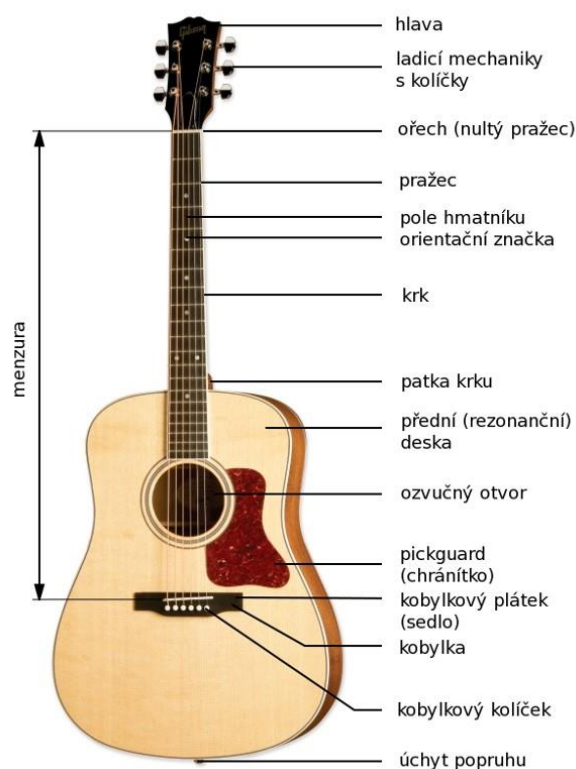
Čím bohatší je spektrum, tím je tón průraznější. Sudé složky ve spektru podporují měkkou a příjemnou bravu, zatímco liché ovlivňují tvrdost a pronikavost. [3] Pro barvu je nejdůležitějších prvních 8 harmonických složek, tzv. první pásmo harmonické řady. Každá zastupuje určitou vlastnost. Postupně od 1. harmonické to je: nosnost, mohutnost, dutost, jasnost, nasalita, jas a brysknost. Druhé pásmo od deváté po šestnáctou harmonickou je tvořeno klastry. Ve třetím pásmu, 17. až 32. harmonická, najdeme spojitě spektrum. Čtvrté pásmo už je pouze šum.

2 AKUSTICKÁ KYTARA

Kytara patří mezi nejoblíbenější hudební nástroje. Radíme ji mezi nástroje strunné. Kromě akustických kytar máme také kytary elektrické, elektroakustické, baskytary. Svoje místo si najde takřka v každém hudebním žánru. Mezi nejoblíbenější akustické kytary patří americké kytary Martin, japonské Yamahy a stále oblíbenější jsou i české kytary Furch.

2.1 Vznik tónu

Tón vzniká rozechvěním struny, která je napjatá mezi pražcem a kobyolkou. Dochází k tzv. stojatému vlnění – uzly a vrcholy zůstávají na stejném místě. Díky měnění polohy jednoho pevného bodu (držení struny na různých pražcích) docílíme různých tónů – měníme vlnovou délku.



Obr. 2.1:1 Části akustické kytary [4]

U každého hudebního nástroje můžeme nalézt tři funkční části [2]:

- Excitátor – budící element
- Oscilátor – kmitající část nástroje
- Rezonátor – vzniklý zvuk zesiluje a vyzařuje

U kytary se nejčastěji setkáváme se dvěma druhy excitátorů. Jedním z nich je samozřejmě prst, popř. nehet, druhým trsátko. Čím tvrdší je excitátor, tím je výsledný tón průraznější a ostřejší.

Oscilátorem je samozřejmě struna. U akustických kytar se nejčastěji setkáváme s kovovými strunami, nejčastější jsou bronzové, případně fosforová bronz. U elektrických je to nejčastěji nikl, nerezová ocel nebo niklovaná ocel. U klasické kytary jsou struny nylonové. Kovové struny se navíc vyrábějí v různých tloušťkách/tvrdostech. Obecně můžeme říct, že tvrdší struny bývají hlasitější a mají delší dozvuk. Při hře na tvrdší struny je ovšem potřeba mít již něco nahráno. [5]

Rezonátorem je tělo kytary neboli ozvučná skříň. Má největší vliv na výslednou barvu tónů. Závisí jak na materiálu desek (přední a zadní deska bývají každá z jiného materiálu), tak na materiálu a poloze kobylinky ale i umístěním žebrování. Nejčastějším typem je tzv. X – systém v několika modifikacích. Jeden takový druh můžeme vidět na obrázku 2.1:2 uvedený na webových stránkách firmy Furch.



Obr. 2.1:2 Žebrování typu X [6]

2.2 Druhy dřev používané pro výrobu

Materiál je pro akustické kytary velmi důležitý, rozhoduje o jejich hudebních vlastnostech. Každý druh dřeva se hodí pro různé části, protože od různých částí požadujeme jiné vlastnosti. Následující odstavce popisují vybrané nejpoužívanější druhy dřev. [7]

Mahagon je používán hned ve dvou odrůdách – Africký a Honduraský. Má hustou strukturu, poskytují zvuk s kulatějšími výškami, pevnými basy a silnějšími středy.

Sitka je odrůda smrku rostoucí především v Severní Americe. Jedná se o jeden z nejčastěji používaných materiálů na přední ozvučnici. Díky pravidelným létům má dostatečnou tuhost a kombinace průraznosti, čistoty tónu a dynamického rozsahu je optimální.

Smrk Adirondack také ze Severní Ameriky je velmi ceněné, používá se u luxusnějších nástrojů na výrobu horní ozvučnice. Má vyváženou frekvenční odezvu s dobrými dynamickými vlastnostmi.

Javor je tradičním materiálem oblíbeným zejména pro svou mechanickou odolnost a pevný jasný tón s prokreslenými výškami, výše posazenými středy a průraznými basy. Vyrábí se z něj luby a zadní desky.

Červený cedr z Kanady má temnější barvu. Jelikož je měkčí než klasický smrk, má vyšší dynamickou citlivost ideální pro prstovou techniku hraní. Nejčastěji se používá pro výrobu horních desek.

Palisandr, konkrétně jeho indická odrůda, má vyvážený zvuk. Je používán nejčastěji na hmatníky, zadní desky, luby a základny kobylek. Exkluzivnější variantou je madagaskarský palisandr. Je tvrdší a díky své struktuře dodává zvuku vyšší pásma.

Africký eben je mechanicky stabilní, poměrně tvrdý. Oproti palisandru má tmavší barvu. Jeho nejčastější užití je na výrobu hmatníků, kobylek, kotvících kolíků strun a dalších menších komponentů kytar.

U levnějších nástrojů nahrazují výše uvedené materiály laminované dřevo (překližka) a vysokotlaký laminát (HPL). Můžou tvořit i celý korpus kytary, můžeme ho najít ale i v kombinaci s jiným dřevem. Výhodou je také odolnost těchto materiálů, která je navíc nenáročná na údržbu. HPL jsou navíc ještě voděodolné.

3 ZKOUMANÉ VLASTNOSTI

V následující kapitole najdeme přehled porovnávaných vlastností.

3.1 Spektrum signálu

Jak již bylo řečeno, každý periodický signál dle pomoci Fourierovy transformace rozložit na jednotlivé složky podle následující rovnice: [2]

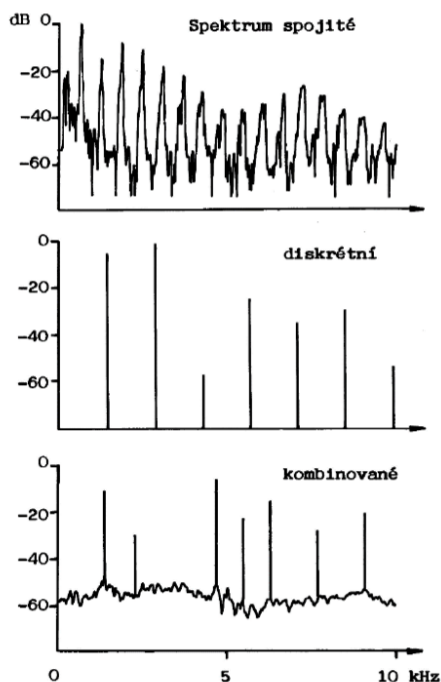
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t], \quad (3.1)$$

kde a_0 je amplituda stejnosměrné složky; a_k , b_k udávají amplitudu složky o frekvenci odpovídající $k\omega$.

Diskrétní neboli čárové spektrum, obsahuje složky oddělené. Takto by byl zobrazen samostatný tón. Jednotlivé „čáry“ znázorňují harmonické složky.

Spojité spektrum bychom viděli např. u stochastických (nahodilých) signálů, jako je například úder paličkou do činelu. Spektrum pak tvoří čára spojující vrcholy bodů FFT.

Spojením obou spekter vzniká spektrum kombinované – ze spojitého spektra vyčnívají výraznější diskrétní složky. Jedná se v podstatě o součet periodického signálu a šumu. [2]

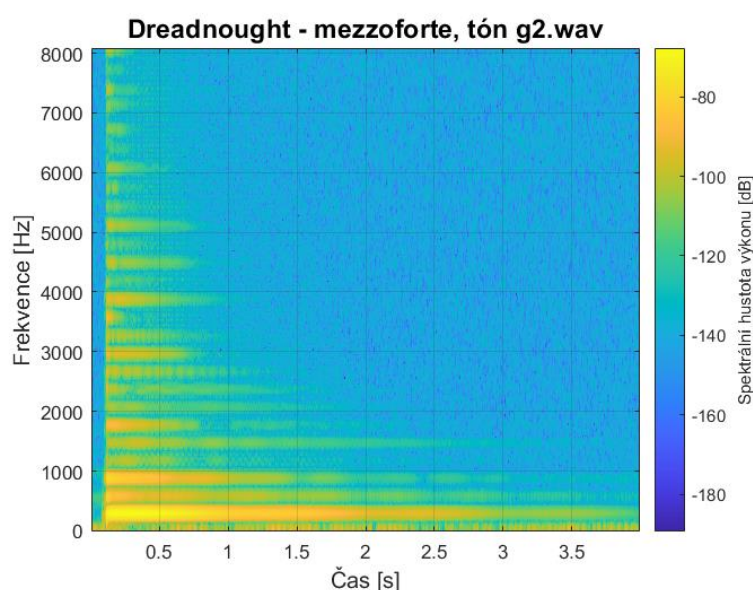


Obrázek 3.1:1 Druhy frekvenčních spekter

Ve spektru můžeme dále nacházet tzv. formantové oblasti, tedy lokální maxima. K jejich vzniku dochází důsledkem rezonance v dutinách nástrojů, hlasového ústrojí, ... Formantové oblasti můžeme zjistit pomocí separace spektrální obálky např. pomocí LPC analýzy.

3.2 Spektrogram

Spektrogram zobrazuje změnu frekvenčního spektra v závislosti na čase. Na ose x je zobrazen čas, na ose y frekvence. Barevně je pak odlišena intenzita jednotlivých složek.



Obr. 3.2:1 Příklad zobrazení spektrogramu

3.3 LPC

Lineární predikce (zkráceně LPC) je hojně používanou metodou při zpracování signálu. Používá se pro získání spektrální obálky. Nejčastěji se s ní setkáme v souvislosti s řečí, např. u vocoderů. Jde o odhad (predikci) aktuální vzorku za pomoci kombinace vzorků předchozích. Princip je popsán následující rovnicí: [8]

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) \quad (3.2)$$

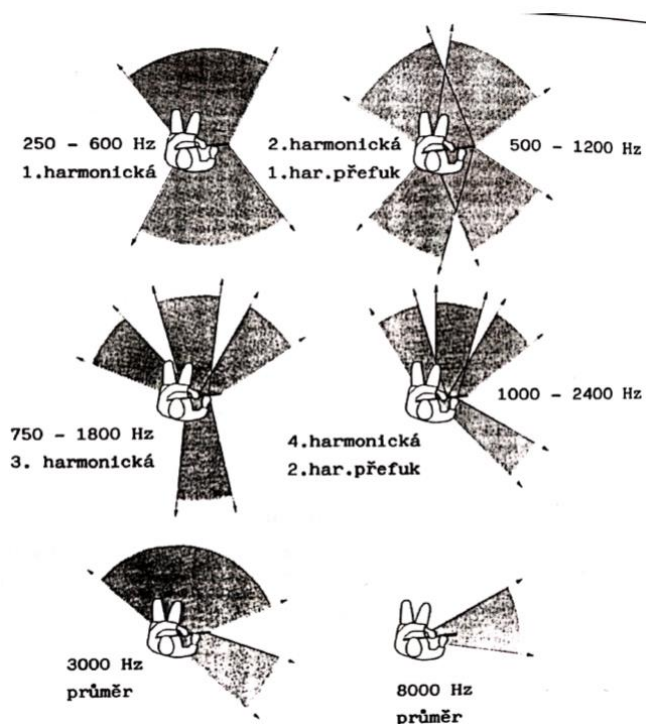
kde $x(n)$ je aktuální vzorek signálu; p řád predikce, udávající počet LPC koeficientů (definuje, jak přesná bude spektrální obálka); a_k koeficient predikčního filtru (volíme tak, abychom se co nejvíce přiblížili kombinaci předchozích hodnot).

3.4 Směrové vyzařování

Žádný reálný zdroj zvuku nevyzařuje svoji akustickou energii do okolního prostoru zcela rovnoměrně ve všech směrech. [2] Vyzařovací schopnosti nástroje závisí na jeho rozměrech, především na oscilátoru a rezonátoru. Směrovost je také závislá na frekvenci hraného tónu – čím vyšší frekvence, tím směrovější vyzařování.

V praxi se směrovost měří pomocí mikrofونů s kulovou charakteristikou uspořádaných do kružnice s poloměrem 2-4 metry. V případě účelových měření by poloměr neměl klesnout pod velikost nástroje a polovinu vlnové délky nejhlubšího tónu. [2]

U některých nástrojů (např. u trubky nebo trombónu) je vyzařování orientováno do osy nástroje, tedy kam míří ústí nástroje jde největší množství energie. U nástrojů jako je např. flétna najdeme více vyzařovacích míst – tónové otvory, otvor náústku. To způsobí nerovnoměrné vyzařování tónů různých frekvencí, viz obrázek 3.4:1.

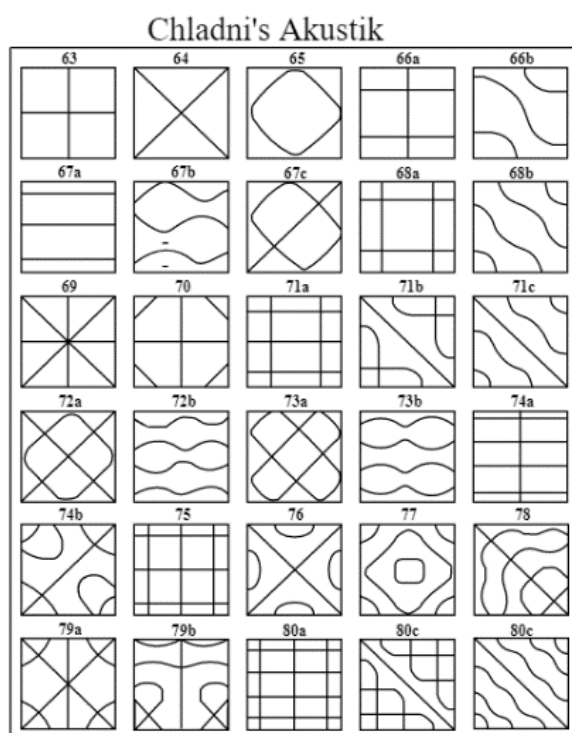


Obrázek 3.4:1 Směrové vyzařování flétny [2]

Směrové vyzařování kytary není tak „jednoduché“ jako u trubky ani tak „složitě“ jako u flétny. Jako vždy záleží na frekvenci hraného tónu. V závislosti na ní dochází k rezonanci určitých částí kytar v důsledku čehož je charakteristika směrovější. [9]

3.5 Chladniho obrazce

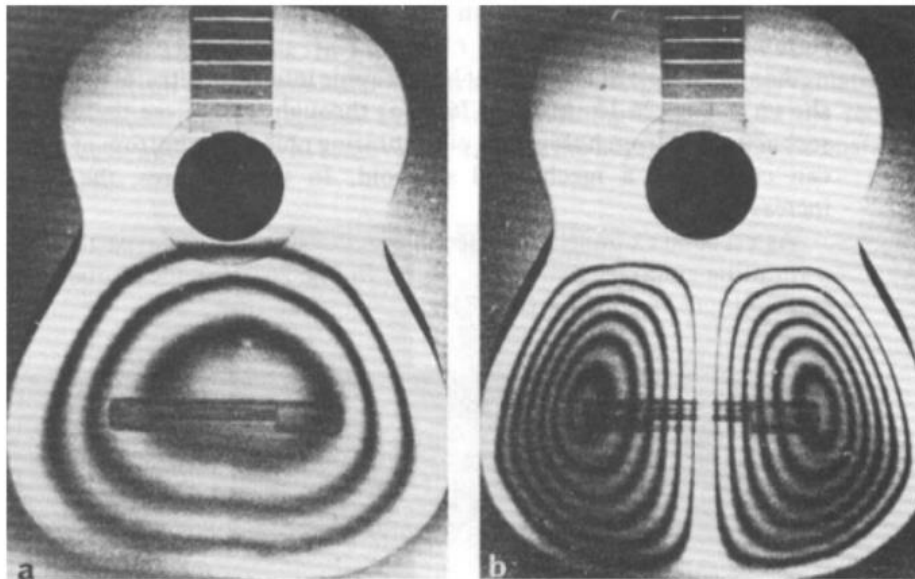
Chladniho obrazce můžeme pozorovat u desek nebo membrán hudebních nástrojů. Při určitých frekvencích dochází k rezonanci části nástroje. Tam, kde deska/membrána nerezonuje, se nachází uzly. Ty spatříme, jestliže desku/membránu posypeme nějakým jemným práškem, např. krupicí. Prášek bude odskakovat z kmiten a bude se hromadit v uzlech, čímž vytvoří ony Chladniho obrazce. Každé rezonanční frekvenci náleží jiný obrazec. Na obrázku vidíme příklad chladniho obrazců na čtvercové desce.



Obr. 3.5:1 Chladniho obrazce na desce [10]

Měření může být provedeno více způsoby. Jedním z nich je již zmiňovaná krupice. Za pomoci hodně výkonného reproduktoru rozvibrujeme desku/membránu nástroje, na kterou jsme nasypali krupici. Reproductorem přehráváme sinusový signál, měníme

frekvence a pozorujeme vzniklé obrazce. Druhým způsobem je nahrazení krupice laserovým paprskem. Výstupem takového měření je pak obrázek podobný obr. 3.5:2.



Obr. 3.5:2 Chladniho obrazce měřené pomocí laseru [11]

4 MĚŘENÍ

Aby výsledky byly co nejpřesnější, měřili jsme v bezodrazové komoře na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. Odstranili jsme tím odrazy zvuku od stěn, i případné zvuky zvenčí. Bylo použito 10 mikrofónů typu AUDIX TM1 s kulovou charakteristikou, které byly pravidelně rozestavěny po obvodu kružnice s poloměrem 1 m. Mezi jednotlivými mikrofony byl úhel 36° a vzdálenost 62 cm. Mikrofony byly nastaveny do stejné výšky, ve které se nacházela ozvučnice kytary. Do polohy 0° byl navíc umístěn mikrofón Brüel&Kjær typ 4189 (pro nás *referenční*) – ten sloužil ke spektrální analýze. Jelikož jsme na měření vzdáleností použili svinovací metr, mohlo dojít k nepřesnostem. Při samotném měření jsme se ještě rozhodli vyměnit židli na obrázku za kulatou klavírní stoličku, aby nedocházelo ke zbytečnému tlumení od opěradla.



Obr. 3.5:1 Rozmístění mikrofónů v bezodrazové komoře

4.1 Měření kytary

Od české firmy Furch Guitars jsem na měření dostala 3 kytary. Lišily se tvarem těla i materiálem, ze kterého byly vyrobeny.

Jedna z kytar byla zapůjčena od spokojeného zákazníka. Byla z trojice považovaná za kytaru s nejlepšími vlastnostmi. Firma chtěla zjistit, v čem spočívá tajemství této kytary a jak její kouzlo dostat i do těch ostatních.

Rozdíly mezi měřenými tvary těl jsou následující:

- Dreadnought – tento typ kytar se začal vyrábět již na počátku 20. století. Tělo kytary je poněkud větší, robustnější. Jedná se o nejběžnější typ akustické kytary, a to hlavně díky svojí všestrannosti – hodí se pro všechny hudební styly. Naše kytara byla s výřezem.
- Orchestra model – tělo tohoto typu je menší než model předchozí. Hodí se pro tzv. fingerstyle hráče, tedy pro ty, kteří hrají prsty.

Tab. 4:1 Vybrané vlastnosti měřených kytar [6][12]

	Green Dc SR	Yellow Plus OM SP
Tělo		
Tvar těla	Dreadnought	Orchestra model
Přední deska	Smrk sitka	Smrk sitka
Zadní deska	Indický palisandr	Padouk
Kobylka	Eben	Eben
Krk		
Šířka nultého pražce	45 mm	45 mm
Materiál hmatníku	Eben	Eben
Materiál krku	Africký mahagon	Africký mahagon
Struny	Elixir Ph-Br Nanoweb 12-53	Elixir Ph-Br Nanoweb 12-53

4.2 Podmínky při nahrávání

V bezdrazové komoře byla po dobu nahrávání teplota 25,4°C. Kytary zde byly ponechány minimálně 2 hodiny, aby na teplotu přivykly.

Uprostřed mikrofonního pole byla na zemi vytvořena značka, aby hráč věděl, kde se má nacházet ozvučnice kytary (červený křížek na obr. 4:1). Také mu bylo zdůrazněno, aby ozvučnice mířila na referenční mikrofon. Při zatlumení částí kytar mohlo dojít k odchylce, protože najednou bylo více věcí, na které bylo potřeba se soustředit.

Hráč hrál středně tvrdým trsátkem zhruba v polovině ozvučnice. Nahrávání bylo rozděleno na pět částí – nahrání každé kytary bez zatlumení, následně kytary dreadnought a referenční se zatlumením. Mezi nimi byly dělány pauzy. Při zatlumení rezonátorů v místnosti byli hned 3 lidé:

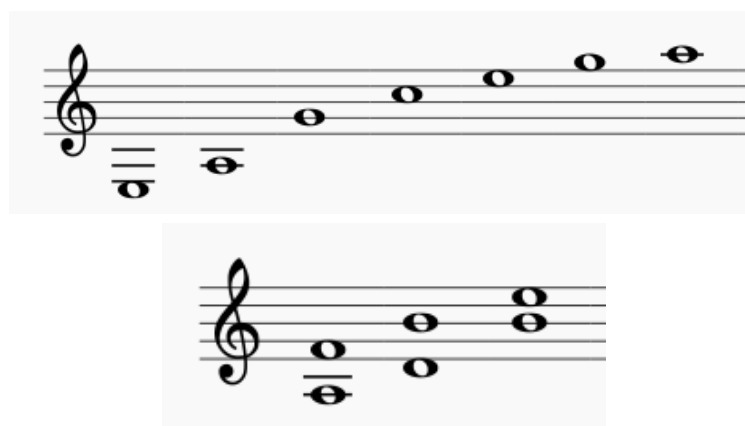
- Hráč – jeho úkolem bylo hrát, v některých případech tlumit
- „tlumič“ – tlumil pomocí níže popsaných pomůcek. Musel dávat pozor, aby nevytvářel akustický stín, tedy aby se nenacházel ve výšce mikrofonů, popř. co nejméně.
- Fotograf – dokumentoval, kde přesně se kytary tlumily



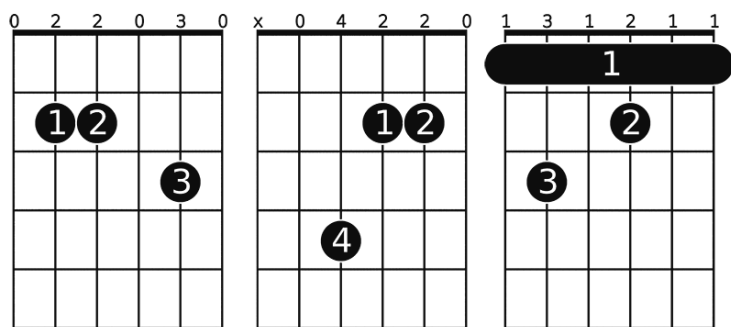
Obr. 4.2:1 Měření kytary Dreadnought se zatlumením přední desky

4.3 Měřené tóny, intervaly, akordy

Při měření směrovosti kytar bylo hráno následujících 7 tónů: *e*, *a* (v 5. poloze), *g1*, *c2*, *e2*, *g2* (12. poloha), *a2*. Tyto tóny byly měřeny v dynamikách piano, mezzoforte, forte. Dále byly měřeny intervaly vždy na dvou sousedních strunách – *a-e1* (kvinta), *d1-h1* (sexta), *h1-e2* (kvarta), všechny ve forte. Následovaly akordy Em7, A6, F7 ve fortissimo. Pro zpracování výsledků byly vždy vybrány jen některé z nich.



Obr. 4.3:1 Hrané tóny a intervaly



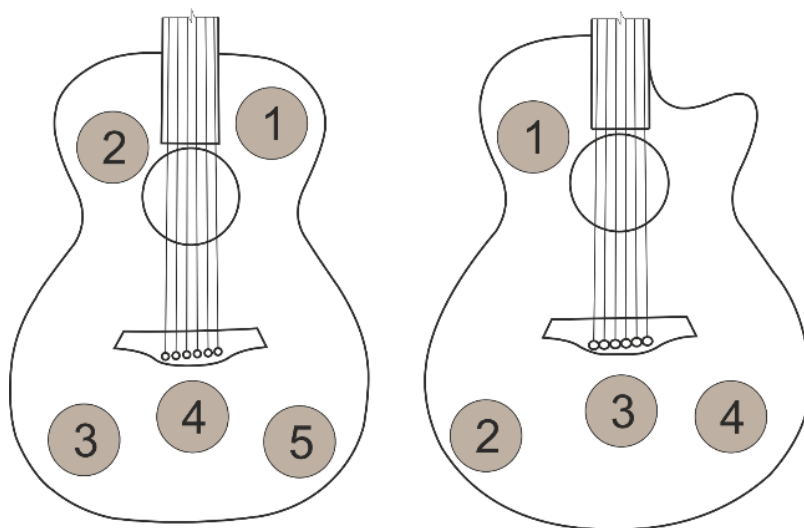
Obr. 4.3:2 Hrané akordy: (zleva) Em7, A6, F7

4.4 Tlumení

Při měření se zatlumenými částmi kytar byly zvoleny takové tóny a akordy, které jsme nahráli bez zatlumování, abychom mohli porovnat změnu ve spektru. Hráli se tóny e, g1 a e2, akordy Em7 a A6 vše ve forte. Takto jsme změřili kytaru referenční a dreadnought.

Jako první se tlumila pouze zadní deska – hráč ji tlumil polštářem, který svým tělem na desce držel.

Pokračovalo se tlumením přední desky, a to postupně v několika bodech pomocí textilových kroužků. Před měřením jsme společně podle poslechu našli nejvhodnější místa na zatlumování – taková, ve kterých byl slyšet po zatlumení největší rozdíl v barvě. Také nám pomohl pan Furch, který u nahrávání byl, protože znal konstrukci kytar, tedy kde se nachází žebrovní atp. No obrázku 4.4:1 vidíme přibližná místa tlumení na přední desce. Jakmile se nahrála všechna místa zvlášť, zatlumila se celá přední deska (viz obr.4.2:1).



Obr. 4.4:1 Přibližná místa zatlumení přední desky kytar; vlevo referenční, vpravo Dreadnought

Následovalo tlumení rezonanční skříně, tedy zakrytí ozvučnice pomocí kusu kartonu. Ten se na těle jemně přidržel, aby se nerozechvěl a nevytvářel tak nežádoucí hluk.

Jako poslední se zatlumila všechna uvedená místa najednou.

4.5 Měření Chladního obrazců

Měření Chladního obrazců proběhlo v nahrávacím studiu na FEKTu. Na obrázku 4.5:1 je vidět, jak měření probíhalo. Kytara se za pomoci provázků „pověsila“ vodorovně nad reproduktor zhruba do výšky 10 cm. Do reproduktoru jsme pouštěli sinusový signál s postupně se zvyšující frekvencí. A to pořádně nahlas, aby vyzářený zvuk desku rozvibroval. Jako detektor uzlů na desce jsme použili obyčejnou krupici. Aby nedocházelo k rozechvění strun podložili jsme je kapesníkem.

Osobně jsem takto změřila pouze kytaru referenční. Další dvě podobným způsobem měřil pro svou práci Lukáš Juhaščík. [13] Výsledky jsem dostala k dispozici a budou zde zmíněny v příslušné kapitole.



Obr. 4.5:1 Měření Chladního obrazců

5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vybrané vzorky byly vyhodnoceny pomocí Matlabu. Při zpracování jsem se držela zdrojů [14] a [15].

Spektrogramy jsem vygenerovala pomocí zabudované funkce *spectrogram*. Následným vykreslením získáme hodnoty jednotlivých harmonických složek v závislosti na čase, respektive vidíme, jak se v závislosti na čase mění.

Výpočet FFT je matlabu také zabudován. Funkce *fft* jako výsledek uvádí i záporné hodnoty složek, proto je třeba vypočítat i její absolutní hodnotu. Ve výsledném grafu pak vidíme jednotlivé harmonické složky a jejich intenzity. Z grafu byly odečteny jejich hodnoty a vepsány do souhrnných tabulek.

Pro LPC analýzu je v matlabu zabudovaná funkce *lpc*, jejíž parametry jsou zvukový vzorek a počet koeficientů neboli řád predikce. Do grafu se také zobrazí centra formantových oblastí. I z těchto grafů nejdeme v následujících kapitolách souhrnné tabulky.

Směrové charakteristiky nám ukazují vyzařovací vlastnosti nástroje. Podle kalibračních vzorků byla nejprve vyrovnána úroveň signálů jednotlivých mikrofonů tak, aby byly všechny stejné a výsledek nebyl zkreslen nepřesně nastaveným gainem mikrofonů. Následně byly nahrány naměřené vzorky a vykreslen polární graf.

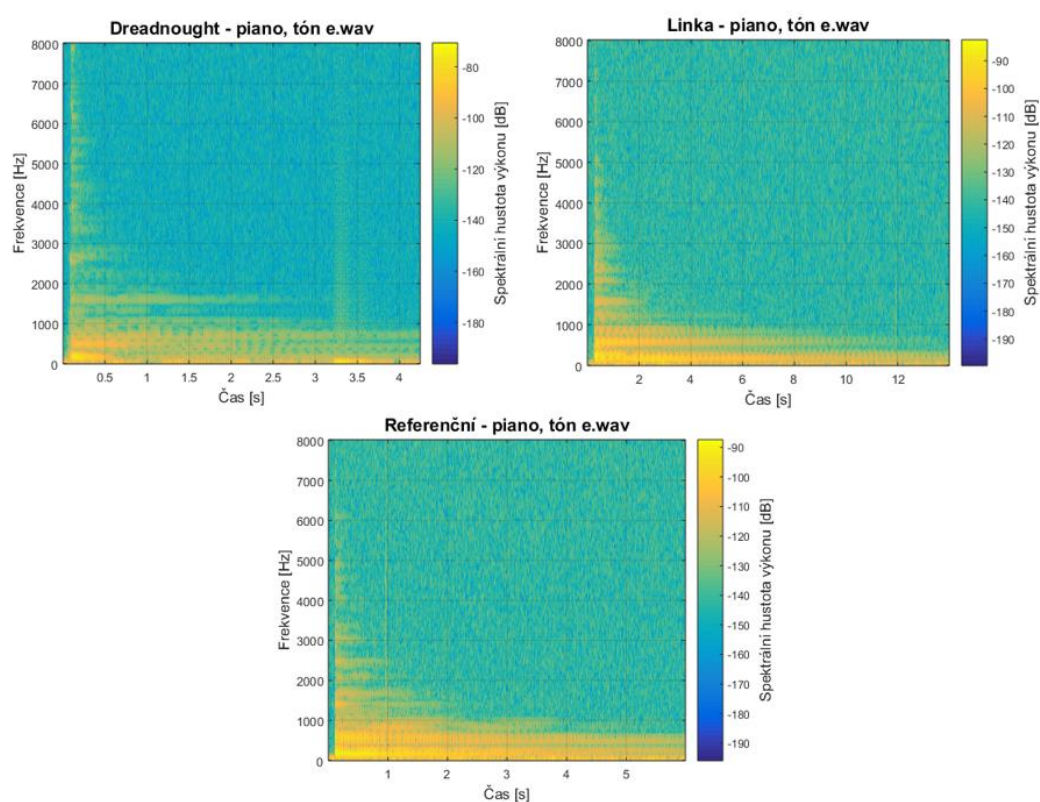
Na analýzu byly vybrány tóny *a*, *e*, *g1*, *c2* a *e2* v různých dynamikách. Tóny byly zvoleny tak, aby pokryly celé spektrum a zároveň byly analyzovány jak prázdné struny, tak struny stlačené v 5. poloze.

5.1 Spektrogramy

V časové analýze se podíváme na tóny postupně od nejhlubšího po nejvyšší. U každého z nich jsou přiložené dvě dynamiky, někde i tři. Postupně vidíme porovnání všech kytar.

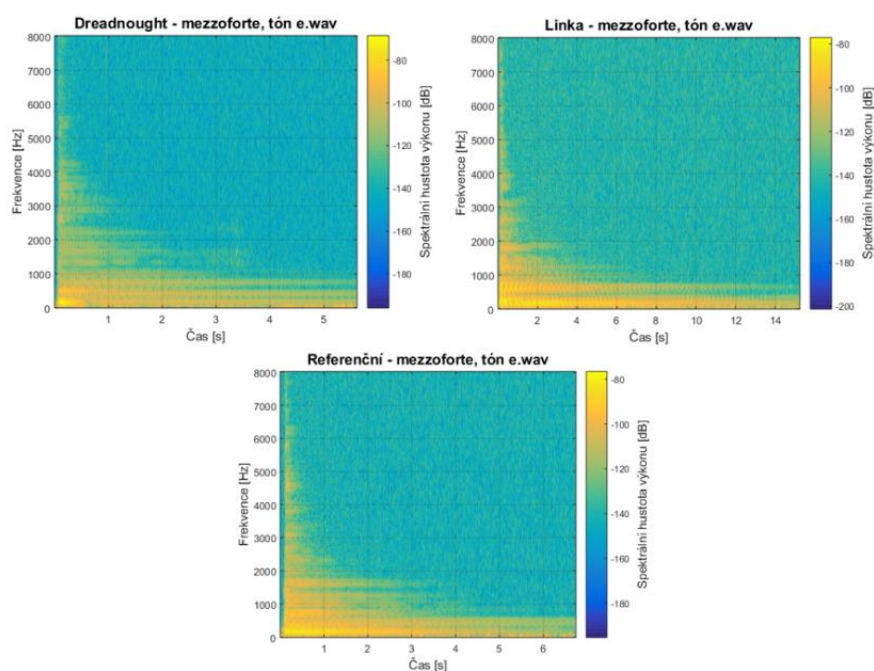
5.1.1 Tón e – prázdná struna

U nižší dynamiky, a zvlášť u nižších tónů, nedojde k vygenerování tolika harmonických složek. U všech kytar převažuje první pásmo, frekvence znějící déle jsou do 2 kHz.



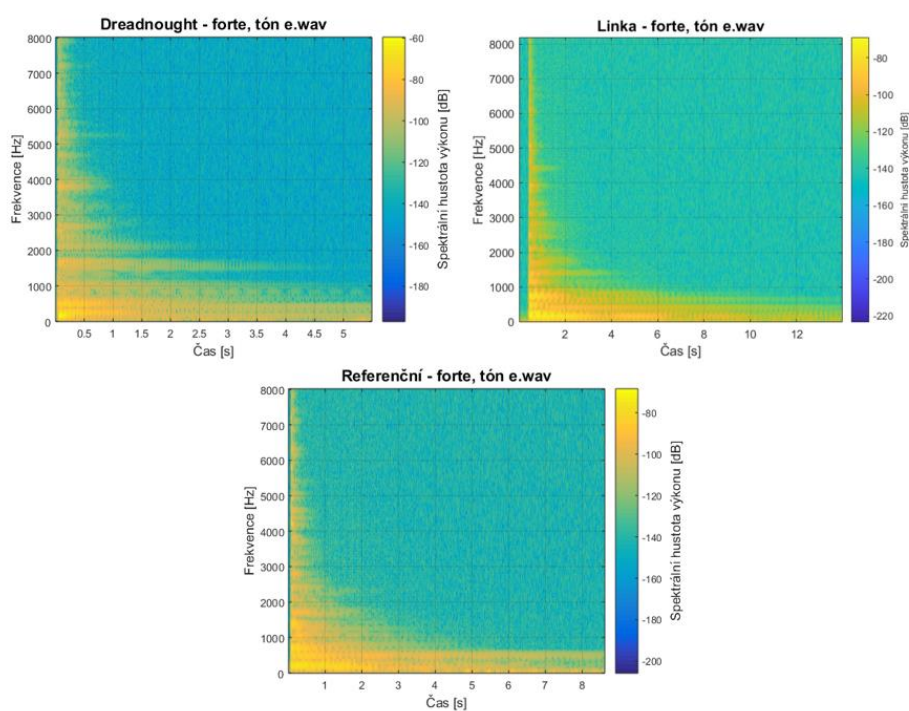
Obr. 5.1:1 Spektrogramy tónu e, piano

V dynamice mezzoforte nejsou patrné další rozdíly, pouze trvá déle odeznění tónů.



Obr. 5.1:2 Spektrogramy tónu e, mezzoforte

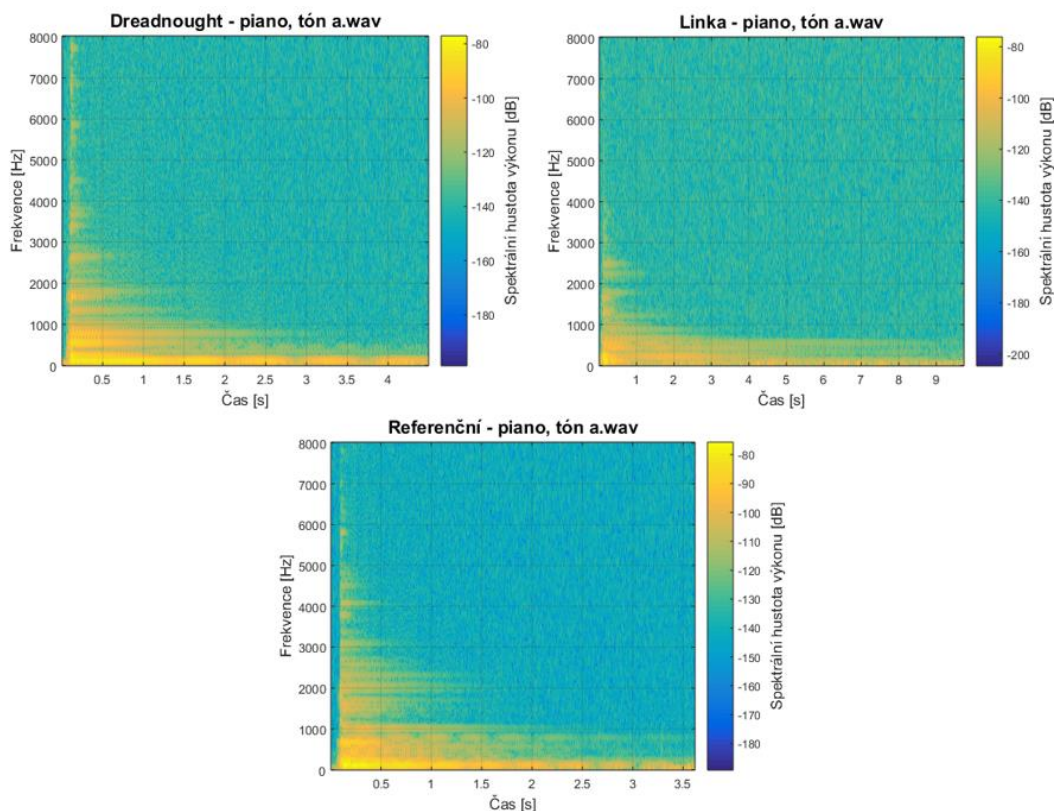
Hluboký tón nám neumožňuje rozeznat jednotlivé harmonické ve spektru. Můžeme si všimnout, že na kytaru Dreadnought nebylo zahráno stejnou silou jako na další dvě, proto tón odezněl nejrychleji. Oproti ostatním kytarám zde zřetelně vidíme formantovou oblast kolem frekvence 1700 Hz.



Obr. 5.1:3 Spektrogramy tónu e, forte

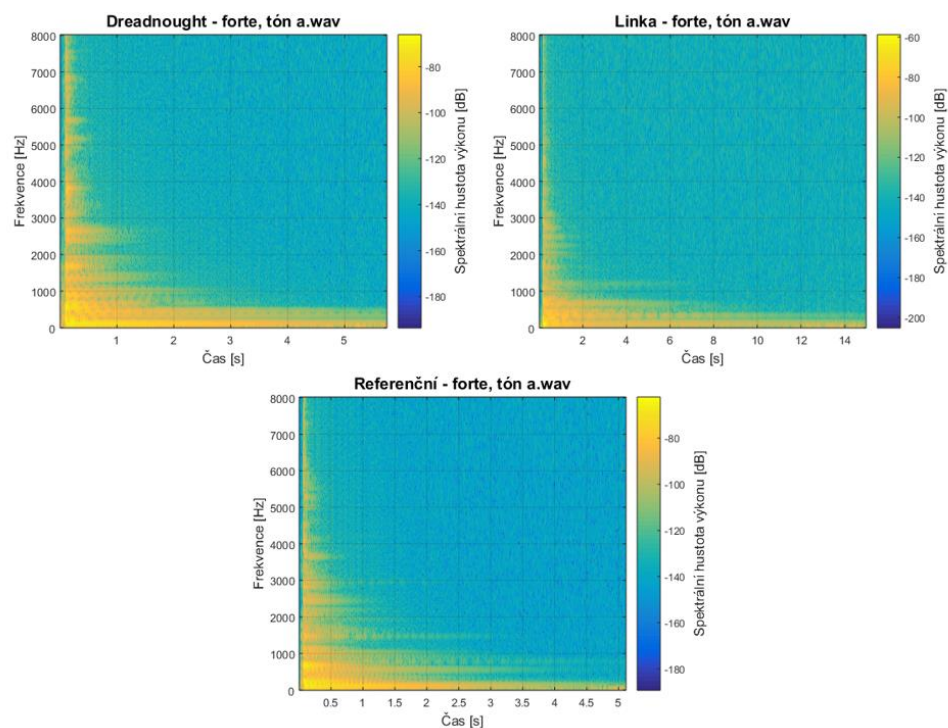
5.1.2 Tón a – 5. poloha

Tím, že fundament tónu a je na frekvenci 110 Hz, hranice znějících harmonických se posouvá na 3 kHz (oproti tónu e v pianu). U referenční kytary si můžeme všimnout, že frekvence kolem 2400 Hz znějí déle než okolní.



Obr. 5.1:4 Spektrogramy tónu a, piano

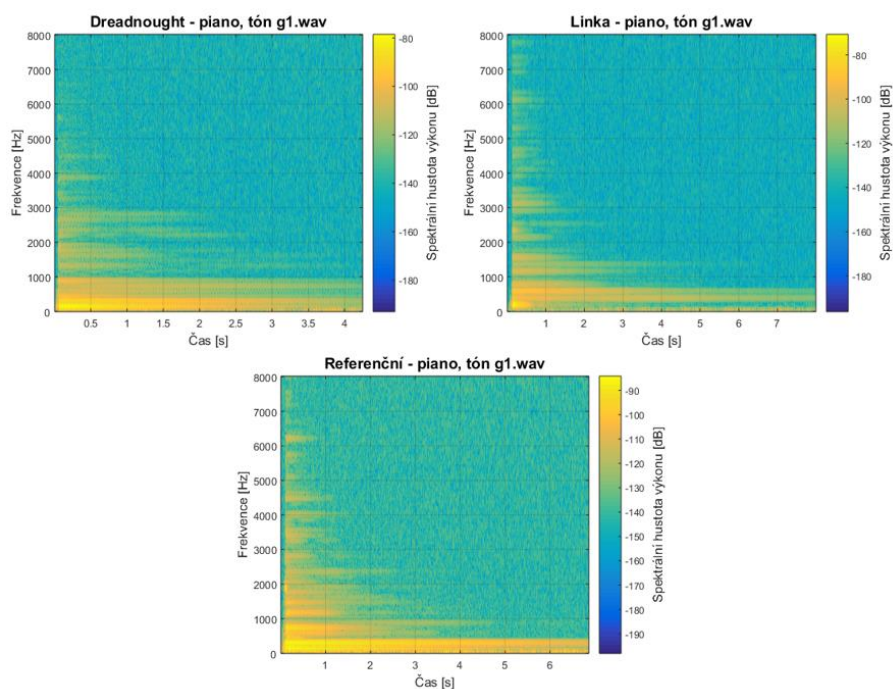
Mezzoforte bylo v tomto případě hráno podobně hlasitě jako piano, proto nepovažuji za nutné ho zde přikládat. V dynamice forte už je patrný rozdíl. Síla hraní na všechny kytary je srovnatelná – přesto ale linková kytara značně vyčnívá. Vyšší harmonické složky odezněly až po více než 14 sekundách. U kytary Dreadnought bohužel došlo k předčasnému ukončení nahrávání kvůli šumu směrových mikrofónů – v řídící místnosti tón již slyšet nebyl, přestože spektrální mikrofón ho stále detekoval.



Obr. 5.1:5 Spektrogramy tónu a, forte

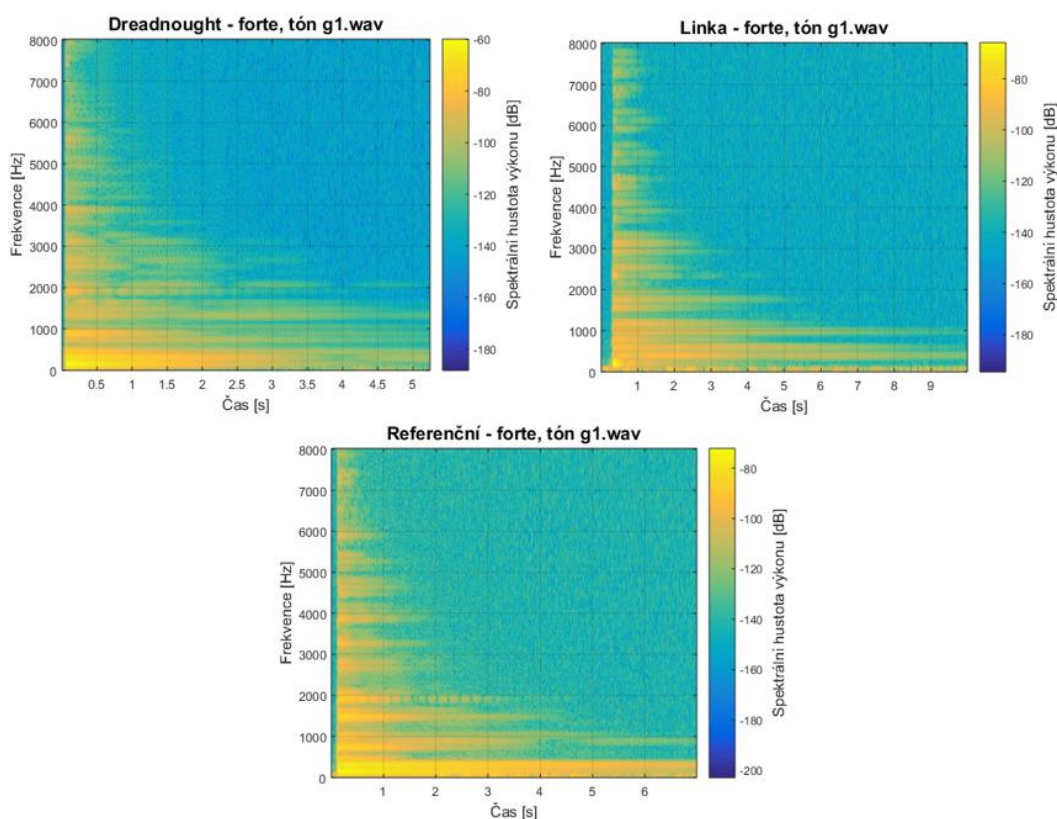
5.1.3 Tón g1 – prázdná struna

V pianu u kytary Dreadnought zní frekvence do 1 kHz, což odpovídá 1. – 5. harmonické, vyšší odezní po 2 sekundách. U kytary z linky je tomu podobně, ovšem zde si můžeme povšimnout frekvence 1,4 kHz (cca 7. harmonická), která odeznívá až po 4 sekundách.



Obr. 5.1:6 Spektrogramy tónu g1, piano

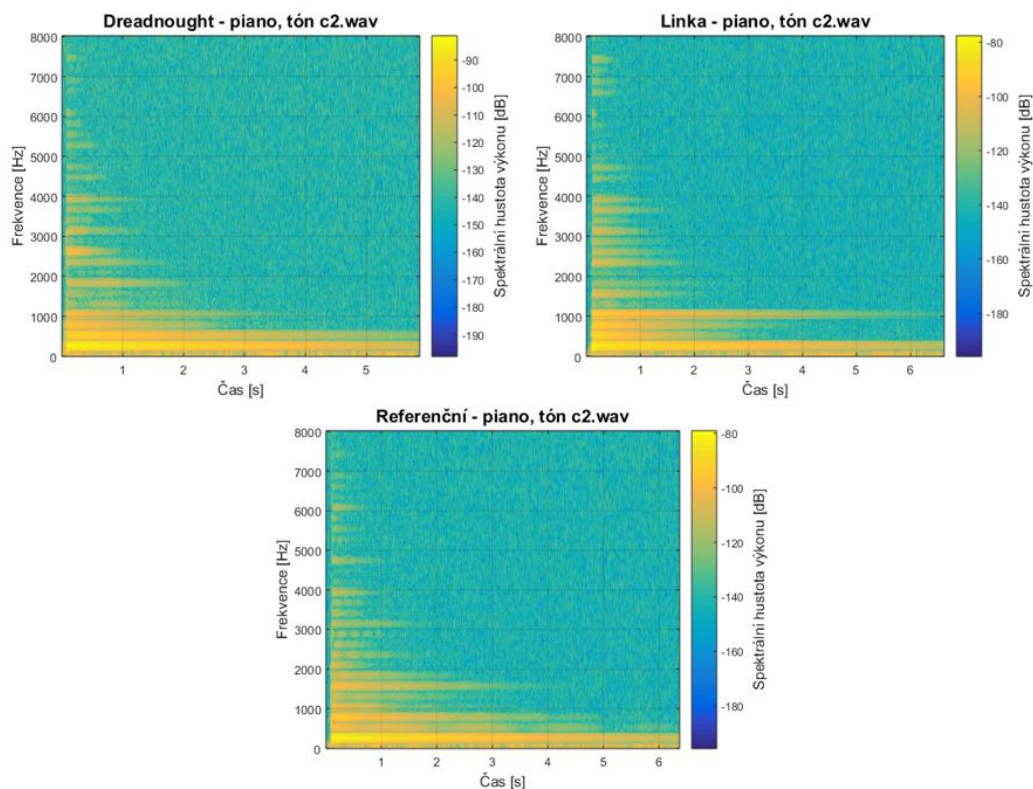
U tohoto tónu se hráči povedlo zahrát podobně dynamiky mezzoforte a forte, rozdílem je pouze doba trvání. Proto přejdu rovnou k popisu spektrogramu v dynamice forte. Bohužel se nám opět podařilo nahrávání ukončit dřív, tentokrát nejvíce utrpěla kytara referenční. Kytara Dreadnought podporuje frekvence až do 3 kHz, zatímco ostatní kytary pouze do 2 kHz. U linkové kytary můžeme předpokládat formantové oblasti u frekvencí 1,7 a 2,5 kHz.



Obr. 5.1:7 Spektrogramy tónu g1, forte

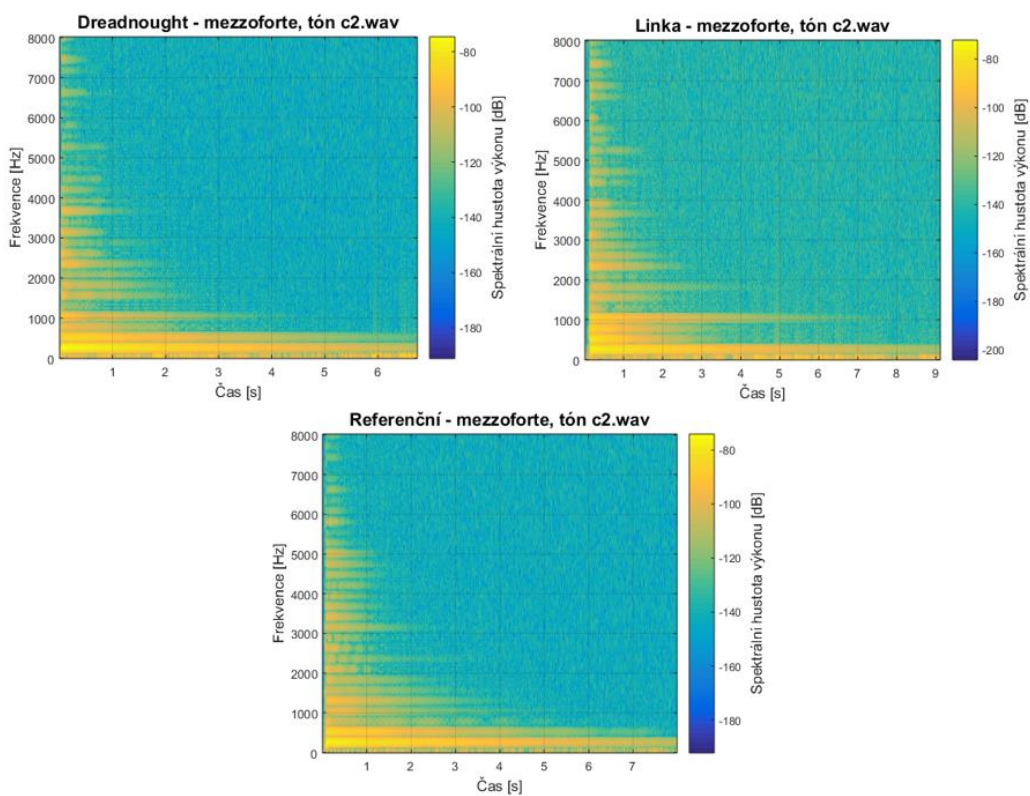
5.1.4 Tón c2 – 5. poloha

U tohoto tónu už zřetelně vidíme jednotlivé harmonické složky. Na první pohled se jeví spektrogramy velmi podobně – hráči se povedlo je zahrát podobnou silou, také mají všechny vzorky délku kolem 6 sekund. Rozdíly jsou v tom, které harmonické zněly nejdéle (kromě fundamentu). U Dreadnought je to 2. harmonická, u linkové 4. harmonická, u referenční se nejdéle udržely 2., 3. a 6. harmonická.



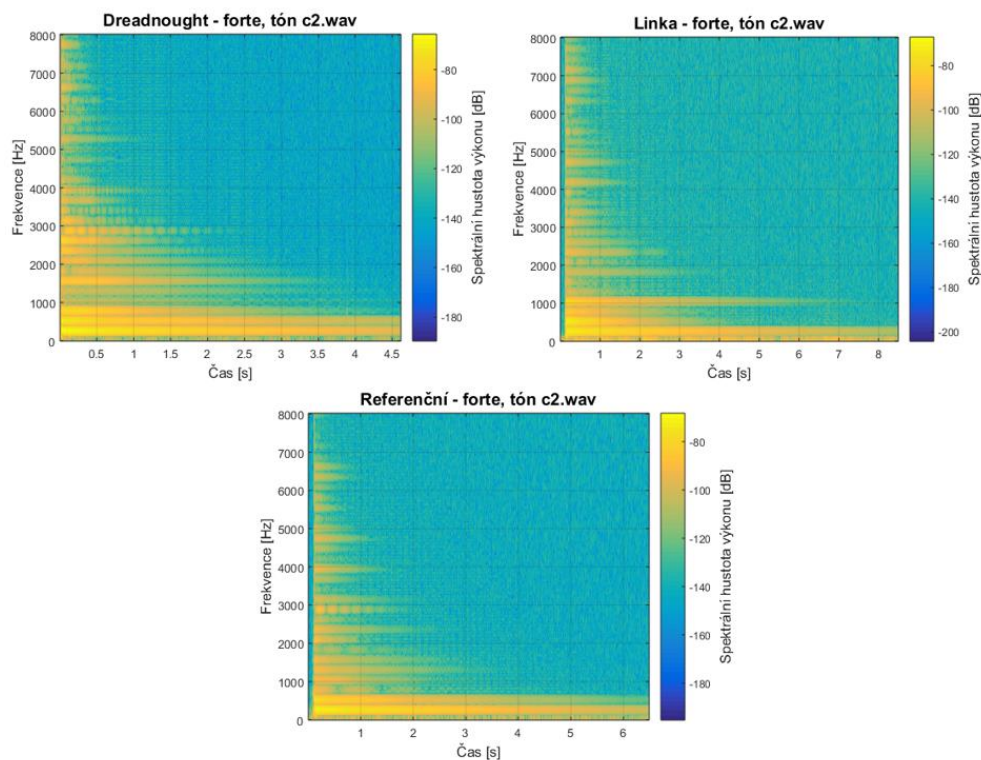
Obr. 5.1:8 Spektrogramy tónu c2, piano

Zvýšení hlasitosti pouze podporuje předchozí tvrzení. Navíc se do spektra dostávají složky z vyšších pásem.



Obr. 5.1:9 Spektrogramy tónu c2, mezzoforte

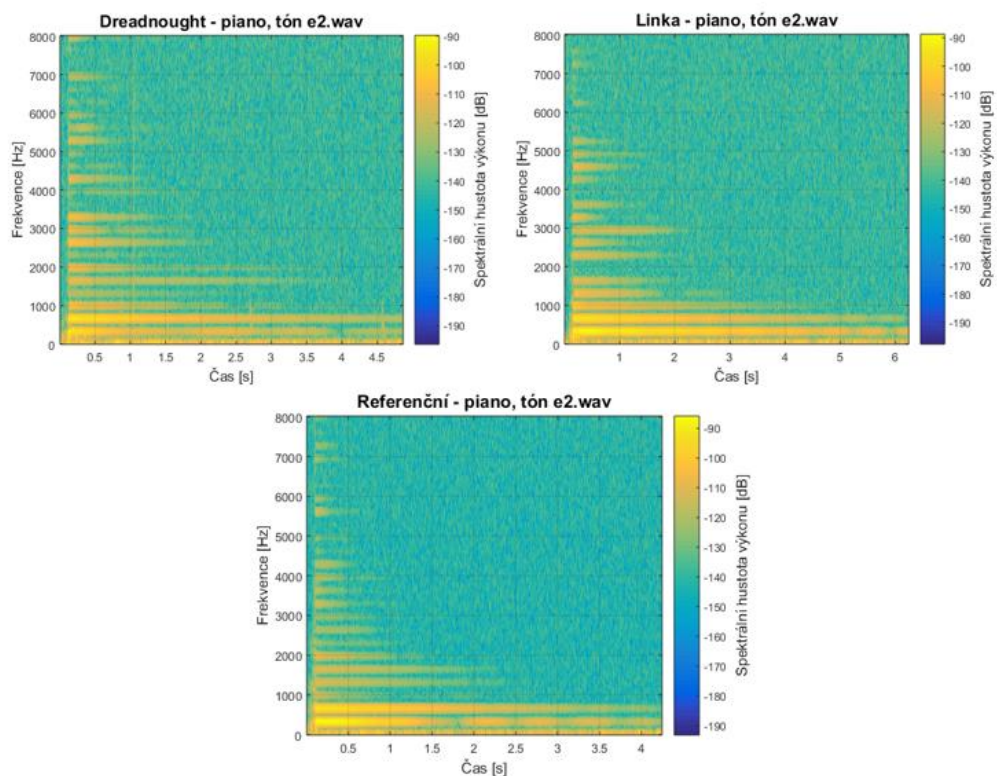
V dynamice forte u linkové kytary vidíme, že zatímco 2. a 3. harmonická odezněly po 3,5 sekundách, 4. harmonická až po dvojnásobném čase. Naopak u kytary Dreadnought 4. harmonickou složku postrádáme. Vidíme také podpoření v oblasti 1700 Hz. Spektrum referenční kytary ustupuje po oblastech od sebe vzdálených o 720-800 Hz.



Obr. 5.1:10 Spektrogramy tónu c2, forte

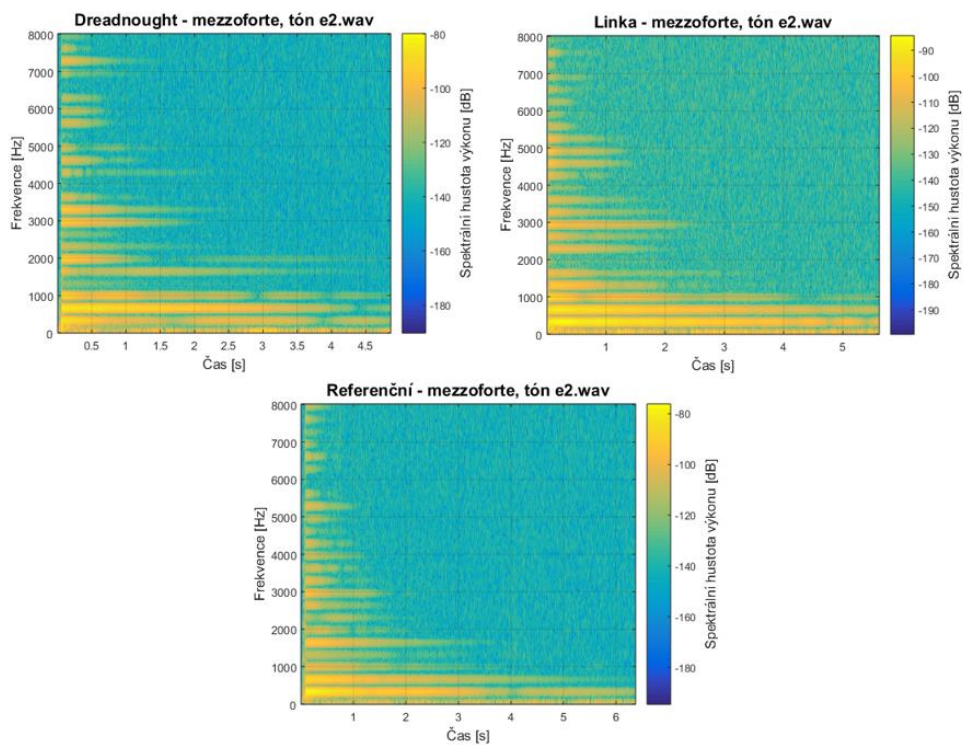
5.1.5 Tón e2 – prázdná struna

Linková kytara má potlačenou každou 6. složku. U kytary dreadnought došlo také k potlačení, konkrétně 4. a 7. harmonické. Výraznější je 5. harmonická na frekvenci kolem 1,7 kHz. Kytara referenční téměř nerozezněla 3. harmonickou.



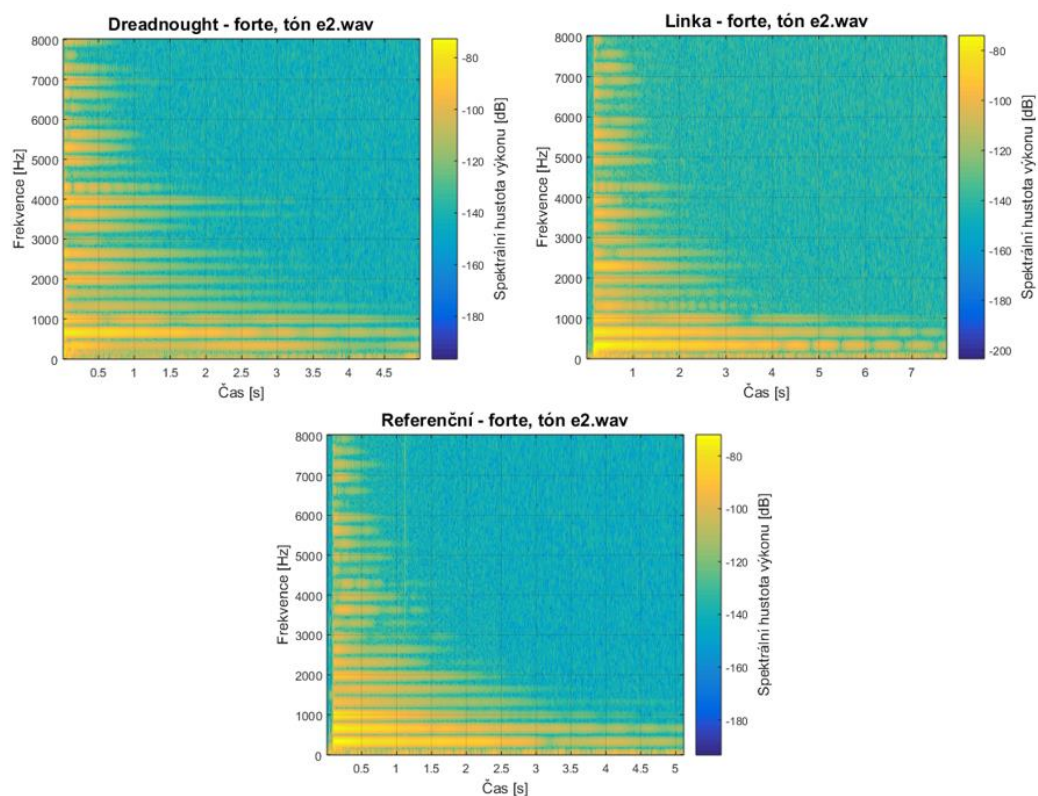
Obr. 5.1:11 Spektrogramy tónu e2, piano

Při zvýšení dynamiky dochází k ještě většímu útlumu zmíněných harmonických u kytar Dreadnought a linkové. Referenční kytara v této dynamice rozezněla všechny harmonické.



Obr. 5.1:12 Spektrogramy tónu e2, mezzoforte

Ve forte utlumení daných složek není tak patrné. U kytary Dreadnought vidíme, že 2. harmonická „převýšila“ tu první. U referenční kytary v tomto případě odeznívají harmonické složky postupně od 8. po 1., netvoří se formantové oblasti. U kytary Dreadnought jednu takovou oblast vidíme na 4 kHz.



Obr. 5.1:13 Spektrogramy tónu e2, forte

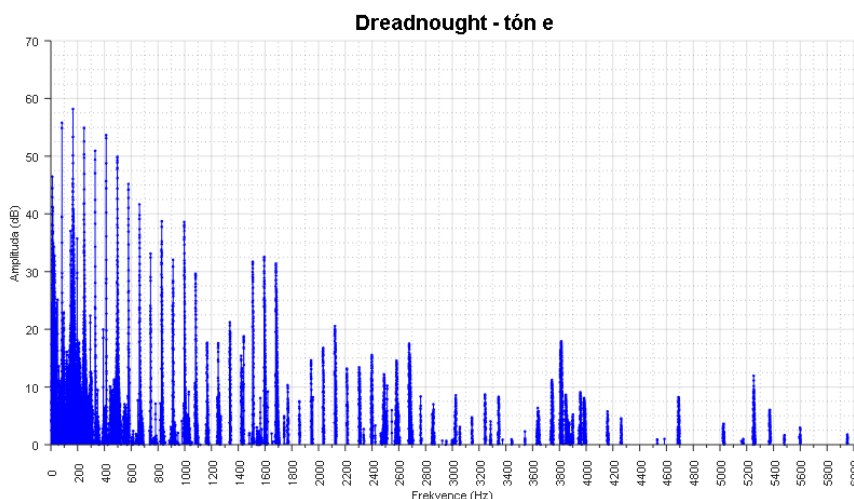
5.2 Porovnání FFT

Pro porovnání spekter jednotlivých kytar byly vybrány tóny *e*, *a*, *g1*, *c2* a *e2* v dynamice forte. Ze spektrogramů totiž vyplynulo, že ve většině případů se ve všech dynamikách kytary chovají podobně, pouze dochází k zesílení jednotlivých složek (a pomalejšímu odeznívání). Tóny byly zvoleny tak, aby pokryly jak frekvence nižší, tak i vyšší. Pro jednoduchost, a hlavně přehlednost byla pro každou kytaru zvolena jiná barva frekvenčního spektra – pro dreadnought modrá, pro Yellow plus červená a pro referenční kytaru zelená. Barvy byly dodrženy i v tabulkách s hodnotami hladin jednotlivých harmonických složek.

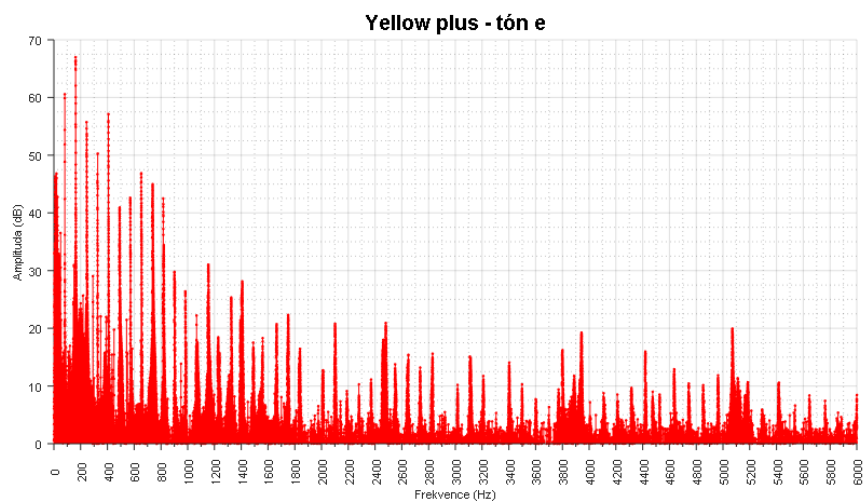
5.2.1 Tón e – prázdná struna

Společným znakem kytar u tohoto tónu je, že první harmonická je vždy oproti druhé potlačena. Je to způsobeno rozměry kytar v závislosti na vlnové délce nejhlubšího tónu.

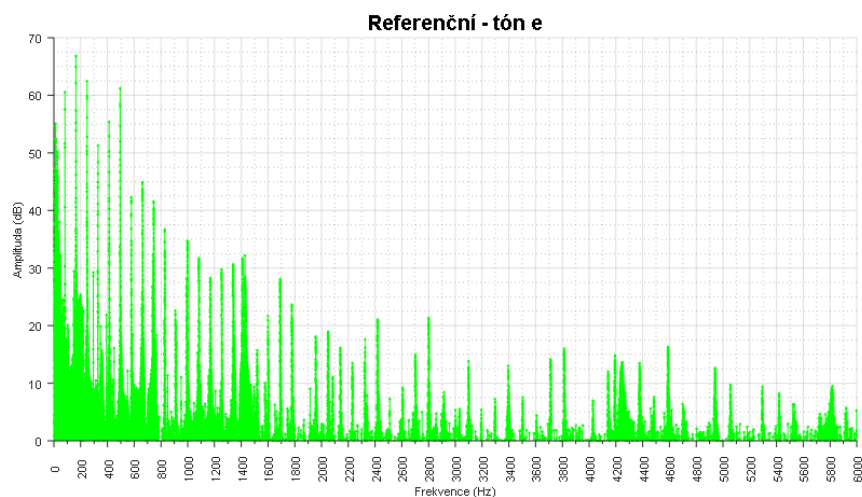
U kytary dreadnought si můžeme všimnout formantových oblastí v okolí 1,6, 3,6 a 5,2 kHz. V prvním pásmu spektra můžeme říct, že hlasitosti složek postupně klesají. V druhé části jsou potlačeny liché složky – 9., 11., 13. a 15. Další dvě kytary mají oproti ní plnější spektrum ve vyšších frekvencích. Referenční kytara má navíc větší odstoupení od šumové složky a činí tak tón čitelnější.



Obr. 5.2:1 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón e



Obr. 5.2:2 FFT spektrum linkové kytary, tón e



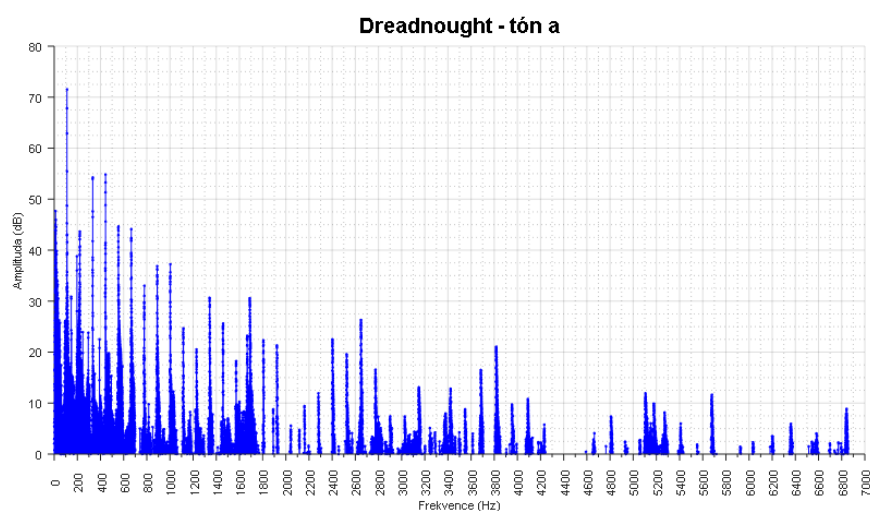
Obr. 5.2:3 FFT spektrum referenční kytary, tón e

Tab. 5:1 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón e

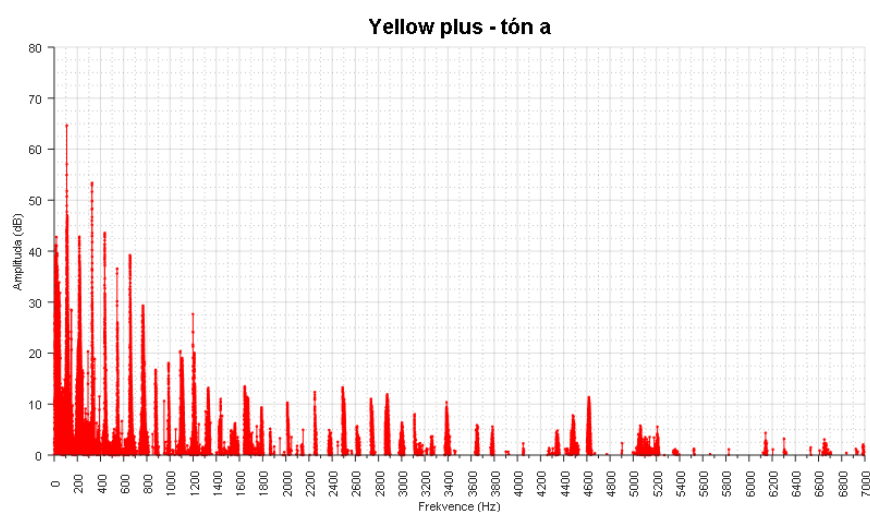
Kytara	Dreadnought	Yellow plus	referenční
analyzovaný vzorek	prázdná struna e		
základní harmonická f_0 [Hz]	82,4	81,4	82,2
hlasitost vyšších harmonických			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	L_3 [dB]
1. harmonická	55,77	60,56	60,52
2. harmonická	58,18	66,99	66,82
3. harmonická	54,84	55,72	62,45
4. harmonická	50,93	50,27	51,30
5. harmonická	53,65	57,11	55,39
6. harmonická	49,90	40,92	61,20
7. harmonická	45,18	42,61	42,25
8. harmonická	41,64	46,88	44,90

5.2.2 Tón a – 5. poloha

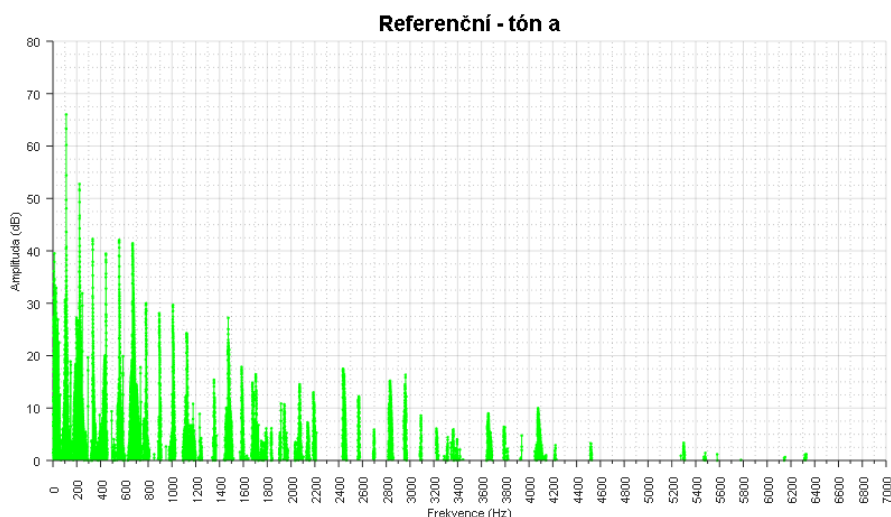
Všechny kytary první harmonickou tohoto tónu podpořily, tóny mají dobrou nosnost. První dvě kytary mají potlačenou druhou harmonickou, a tedy ztrácí mohutnost. Referenční kytara má druhou harmonickou vyšší, naopak má potlačenou třetí a čtvrtou harmonickou, což má za následek, že tón je v barvě méně tupý a také ztrácí jasnost. U kytary dreadnought jsou opět patrné formantové oblasti v okolí 2,6 a 3,8 kHz.



Obr. 5.2:4 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón a



Obr. 5.2:5 FFT spektrum linkové kytary, tón a



Obr. 5.2:6 FFT spektrum referenční kytary, tón a

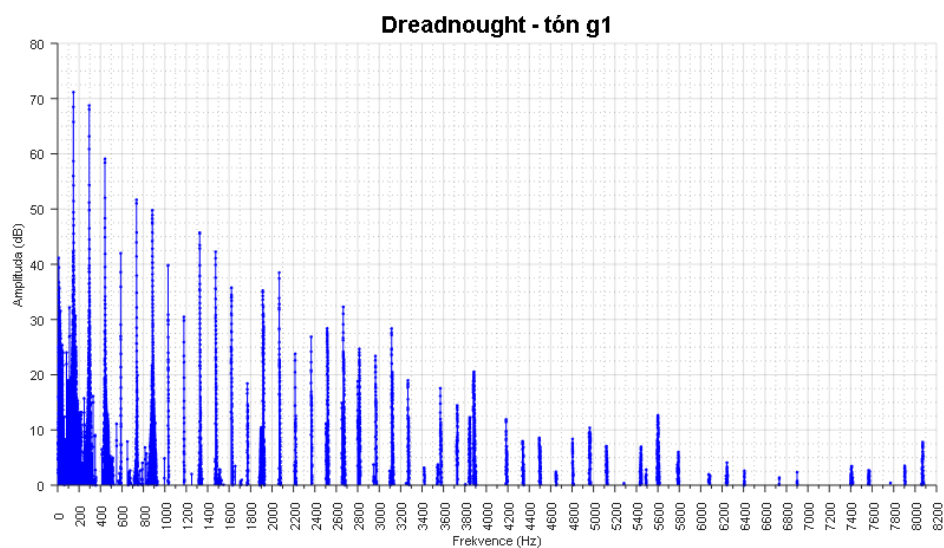
Tab. 5:2 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón a

Kytara	Dreadnought	Yellow plus	referenční
analyzovaný vzorek	a v 5. poloze		
základní harmonická f_0 [Hz]	111,0	108,7	111,6
hlasitost vyšších harmonických			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	L_3 [dB]
1. harmonická	71,51	64,63	66,02
2. harmonická	43,63	42,81	52,74
3. harmonická	54,25	53,38	42,24
4. harmonická	54,83	43,58	39,45
5. harmonická	44,64	36,54	42,07
6. harmonická	44,11	39,22	41,42
7. harmonická	33,01	29,30	29,99
8. harmonická	36,87	16,72	28,06

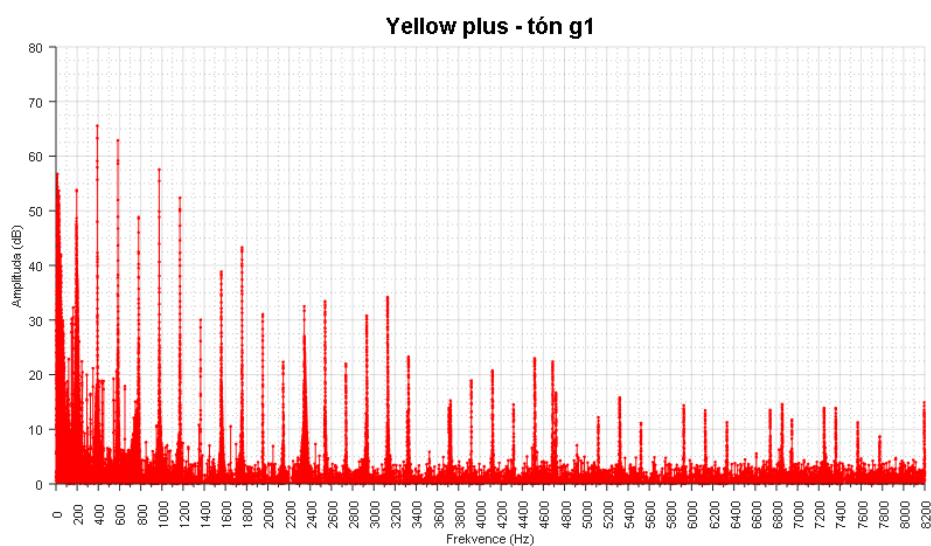
5.2.3 Tón g1 – prázdná struna

Při měření prázdné struny *g1* jsme přes to, že nás bylo u měření spousta nepoznali, že hned dvě kytary byly rozladěné – dreadnought a referenční (hodnoty fundamentu můžete vidět v tab. 9.3). Nahrané a vyhodnocené vzorky odpovídají zhruba tónu *e1* (147 Hz).

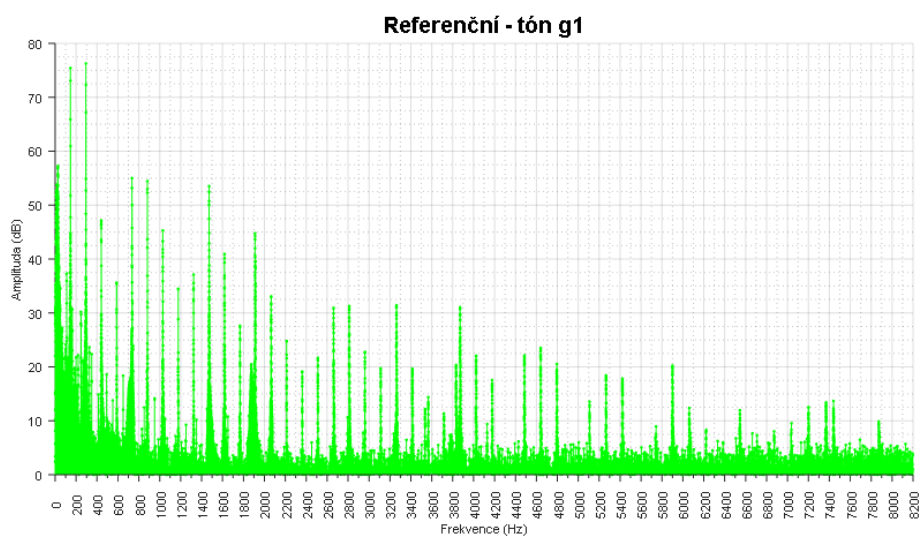
U obou „falešných“ kytar vypadá první pásmo podobně – první dvě složky hlasité, čtvrtá, osmá a dvanáctá složka potlačeny – zahrané tóny byly méně jasné. Kytara Yellow plus má opět potlačenou první harmonickou a dále pak každou třetí – v barvě ztratí na jasnosti a brysknosti.



Obr. 5.2:7 Frekvenční spektrum kytary Dreadnought, tón g1



Obr. 5.2:8 FFT spektrum linkové kytary, tón g1



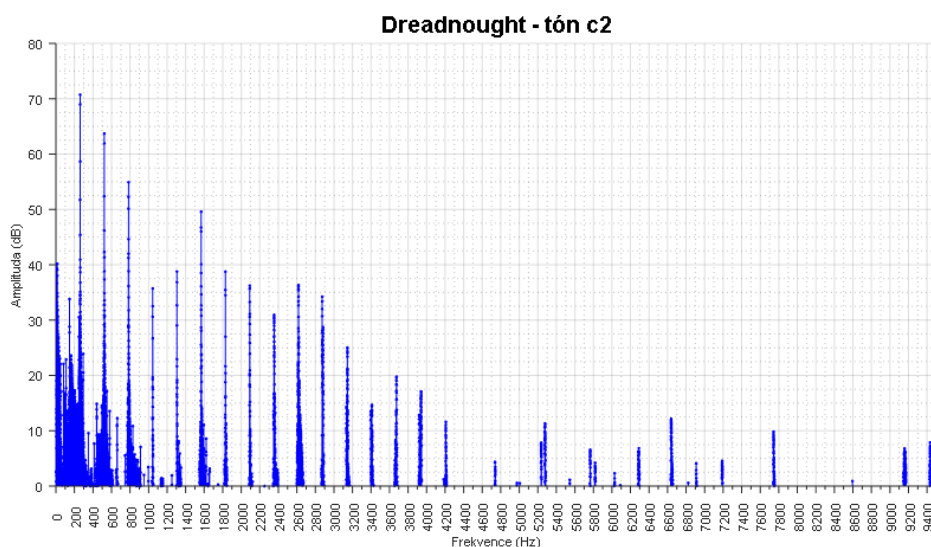
Obr. 5.2:9 FFT spektrum referenční kytary, tón g1

Tab. 5:3 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón g1

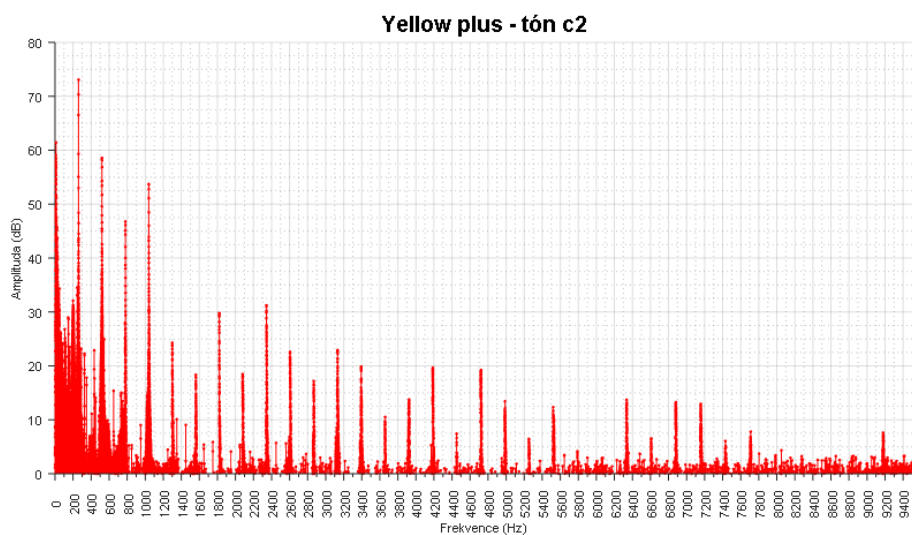
Kytara	Dreadnought	Yellow plus	referenční
analyzovaný vzorek	prázdná struna g1		
základní harmonická f_0 [Hz]	146,9	195,6	146,6
hlasitost vyšších harmonických			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	L_3 [dB]
1. harmonická	71,16	53,78	75,42
2. harmonická	68,75	65,55	76,23
3. harmonická	59,09	62,88	47,14
4. harmonická	42,00	48,82	35,63
5. harmonická	51,68	57,54	55,01
6. harmonická	49,77	52,36	54,44
7. harmonická	39,83	30,05	45,31
8. harmonická	30,48	38,84	34,48

5.2.4 Tón c2 – 5. poloha

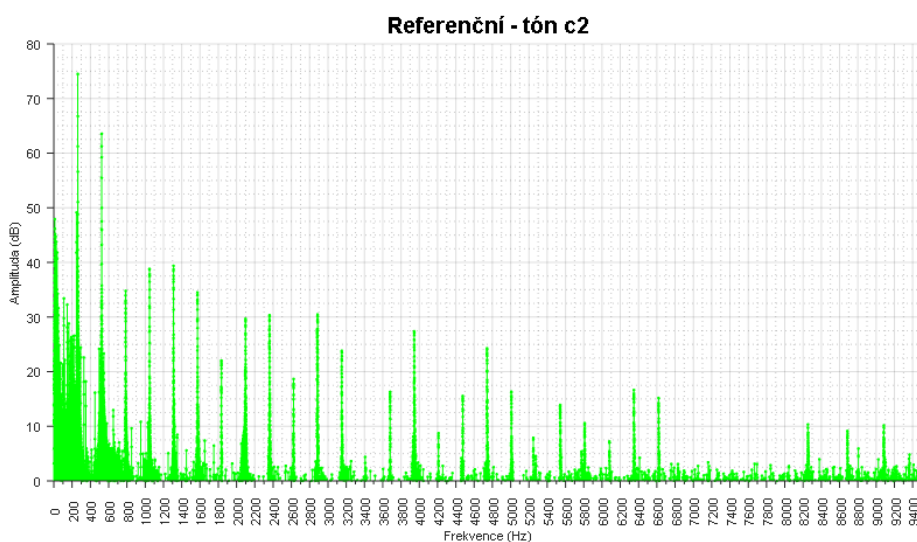
Kytara dreadnought má opět na celém spektru velký odstup od šumové složky, která je minimální. Je potlačena čtvrtá harmonická, a přestože další sudá harmonická je hlasitější než okolní, barva stejně nebude tak jasná. Kytara Yellow plus má naopak čtvrtou složku výraznou, tón v jejím podání má jasnější barvu (oproti dread. o 18 dB). Referenční kytara má potlačenou třetí a sedmou harmonickou – tón je tedy méně tupý a bryskní.



Obr. 5.2:10 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón c2



Obr. 5.2:11 FFT spektrum linkové kytary, tón c2



Obr. 5.2:12 FFT spektrum referenční kytary, tón c2

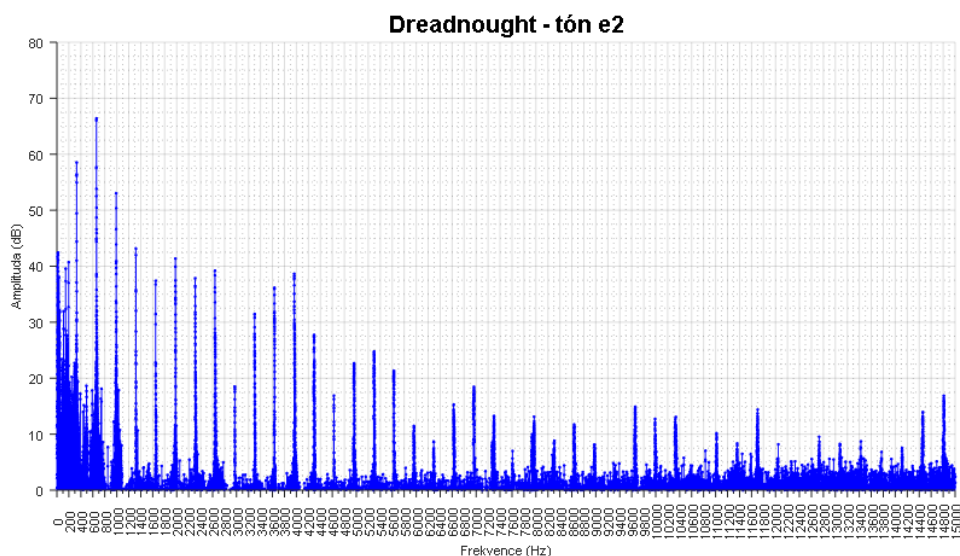
Tab. 5:4 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón c2

Kytara	Dreadnought	Yellow plus	referenční
analyzovaný vzorek	c2 v 5. poloze		
základní harmonická f_0 [Hz]	261,4	260,6	262,3
hlasitost vyšších harmonických			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	L_3 [dB]
1. harmonická	70,73	73,07	74,52
2. harmonická	63,70	58,56	63,55
3. harmonická	54,91	46,76	34,76
4. harmonická	35,71	53,73	38,81
5. harmonická	38,78	24,31	39,36
6. harmonická	49,58	18,36	34,50
7. harmonická	38,74	29,77	22,03
8. harmonická	36,22	18,46	29,67

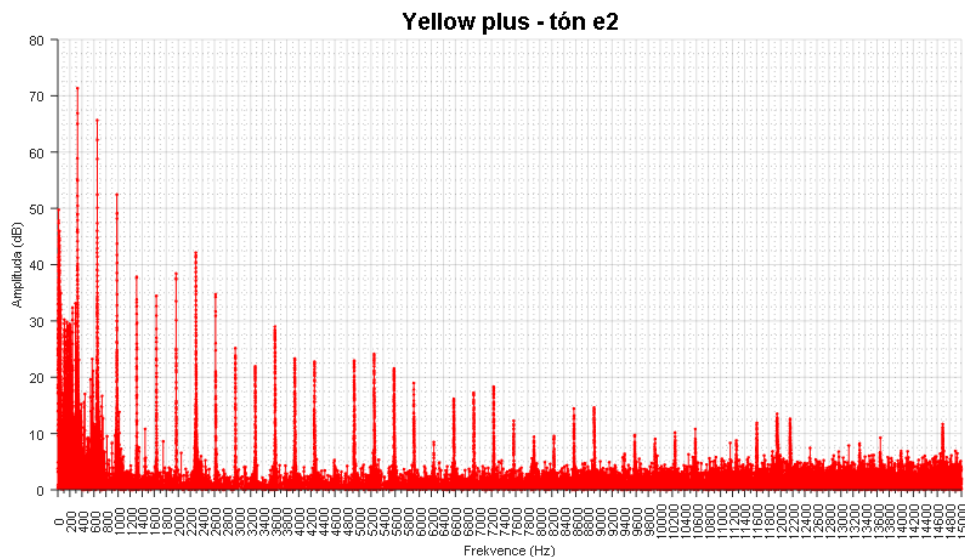
5.2.5 Tón e2 – prázdná struna

U tohoto tónu se nejvíce projevila šumová složka. Ve vyšších frekvencích má od ní největší odstup kytara dreadnought, přestože složky v první pásmu mají nižší hlasitost než ostatní měřené kytary. Tón má opět menší nosnost, protože fundament má pouze 58,5 dB.

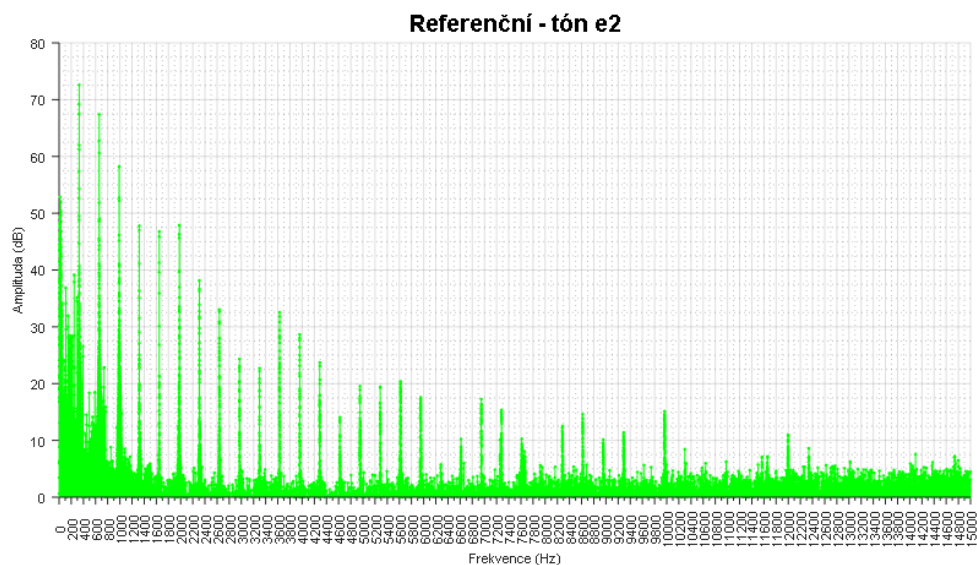
U všech kytar se kolem frekvencí 3,7, 5,3 a 7 kHz tvoří mírné formanty.



Obr. 5.2:13 FFT spektrum kytary Dreadnought, tón e2



Obr. 5.2:14 FFT spektrum linkové kytary, tón e2



Obr. 5.2:15 FFT spektrum referenční kytary, tón e2

Tab. 5:5 Porovnání hlasitosti prvního pásma FFT spektra, tón e2

Kytara	Dreadnought	Yellow plus	referenční
analyzovaný vzorek	prázdná struna e2		
základní harmonická f_0 [Hz]	329,8	327,2	330,0
hlasitost vyšších harmonických			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	L_3 [dB]
1. harmonická	58,53	71,35	72,59
2. harmonická	66,40	65,65	67,39
3. harmonická	53,02	52,44	58,23
4. harmonická	43,15	37,83	47,81
5. harmonická	37,40	34,45	46,77
6. harmonická	41,37	38,41	47,87
7. harmonická	37,83	42,12	38,17
8. harmonická	39,18	34,74	33,03

5.3 LPC analýza

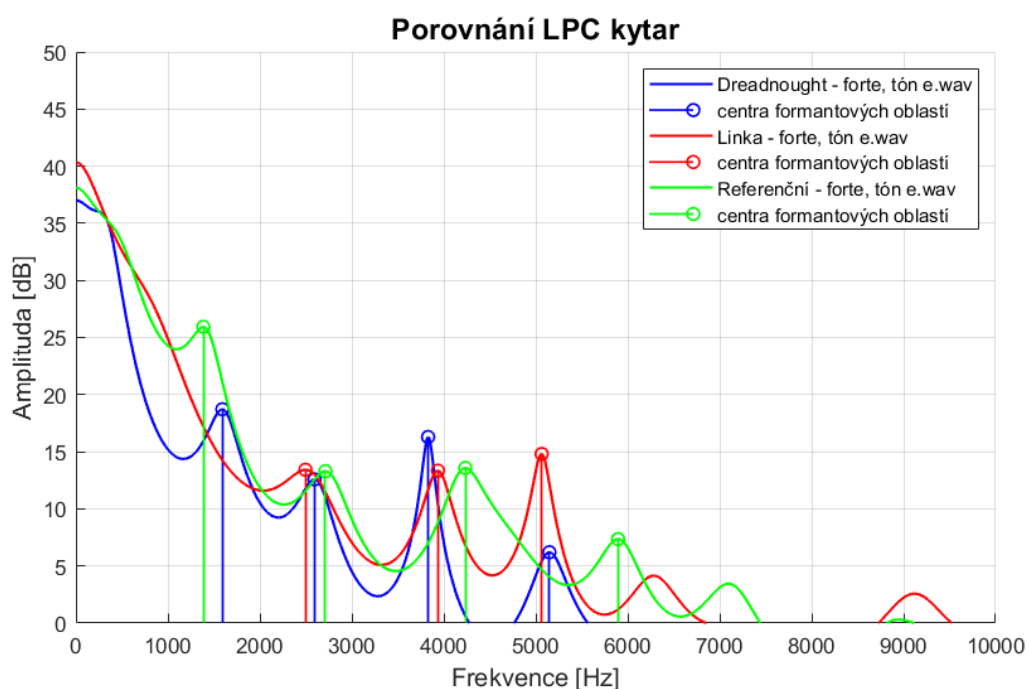
LPC analýza nám odhalila formanty jednotlivých kytar. Řád predikce byl nastaven stejně, jako by se jednalo o vzorek řeči, tedy podle $p = 4 + f_{vz}/1000$. Ve většině případů nám to stačilo pro identifikaci 4 formantových oblastí.

Poloha formantů u kytar je značně individuální. Záleží jak na materiálu, tak na tzv. ladění spodní desky, žebrování, poloze a provedením kobylky atd. Na výsledné spektrum má také vliv technika hry a materiál strun [2] Formanty v okolí 400 Hz zajišťují sytost tónu. V okolí 1 kHz se nacházejí formanty spojované s nasalitou tónu. Další oblast je rozmezí 1,6-2,6 kHz. V této oblasti se nacházející formanty zajišťují tónu jasnost a světlost. Pro rozmezí 2,6-4 kHz je pak typická ostrost tónu. Tato charakteristika vychází z popisu formantů jednotlivých vokálů. [2]

V jednom grafu jsou zobrazeny vždy spektrální obálky všech kytar, abychom mohli pozorovat rozdíly mezi nimi. Přiloženy jsou také tabulky s frekvencí center formantových oblastí, jejich úrovní hlasitosti a kde to bylo možné, tak i šířkou daného formantu. Šířku formantu určíme podle poklesu hlasitosti o 3 dB.

5.3.1 Tón e – prázdná struna

Linková kytara oproti ostatním postrádá první formant – tónu schází v barvě nasalita. Následující formant najdeme na 2,5 kHz. U všech kytar se hladina tohoto formantu přibližuje 13 dB, avšak pouze u Dreadnought bylo možná určit šířku dané oblasti. Následující formant se nachází přibližně ve 4 kHz. Díky užšímu spektru bude tón kytary Dreadnought ostřejší než ostatních dvou.



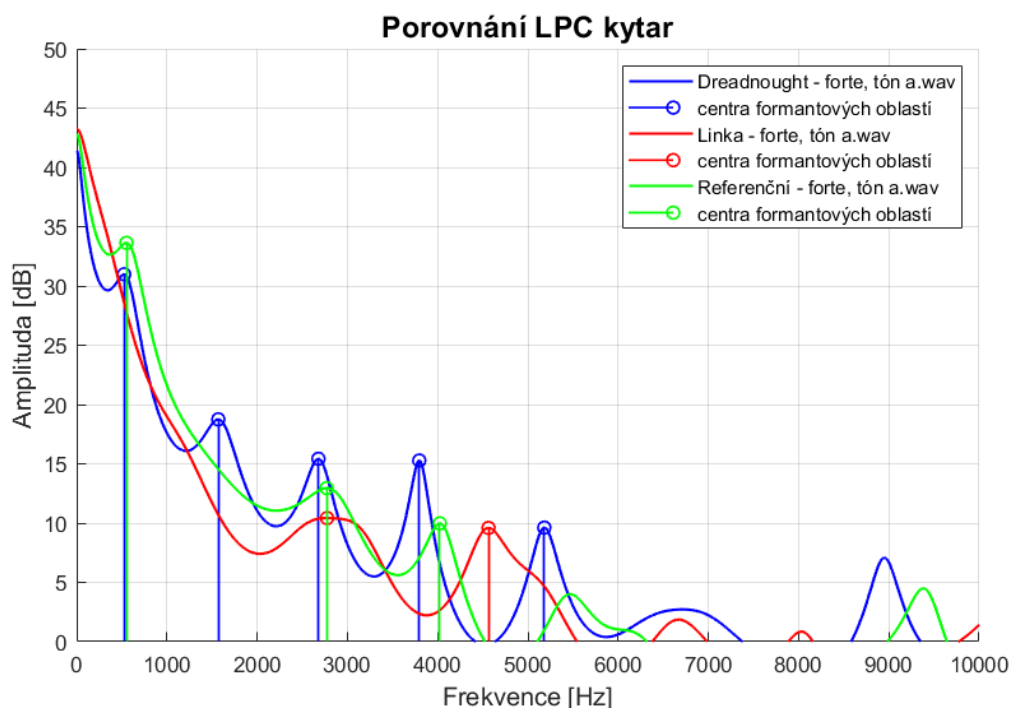
Obr. 5.3:1 Porovnání LPC kytar, tón e

Tab. 5:6 Porovnání formantových oblastí, tón e

	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	analyzovaný vzorek: <i>prázdná struna e</i>								
formant	f ₁ [Hz]	L ₁ [dB]	šířka [Hz]	f ₂ [Hz]	L ₂ [dB]	šířka [Hz]	f ₃ [Hz]	L ₃ [dB]	šířka [Hz]
1.	1591	18,72	1367-1775	2495	13,42	-	1385	25,93	-
2.	2584	12,46	2275-2771	3936	13,35	3778-4087	2712	13,30	2249-2933
3.	3829	16,29	3763-3891	5064	14,8	4958-5156	4234	13,58	4031-4495
4.	5149	6,20	4954-5349	-	-	-	5895	7,35	5582-6119

5.3.2 Tón a – 5. poloha

Z grafu vidíme, že linková kytara opět postrádá první formant v okolí 500 Hz zajišťující sytost tónu. Kytara Dreadnought má v tomto případě nejvíce formantových oblastí. Výsledný tón je světlý a jasný. U linkové kytary byly zjištěny pouze dva formanty na frekvencích 2775 a 4564 Hz. Nejsou ovšem příliš průrazné, tón této kytary je nejméně ostrý.



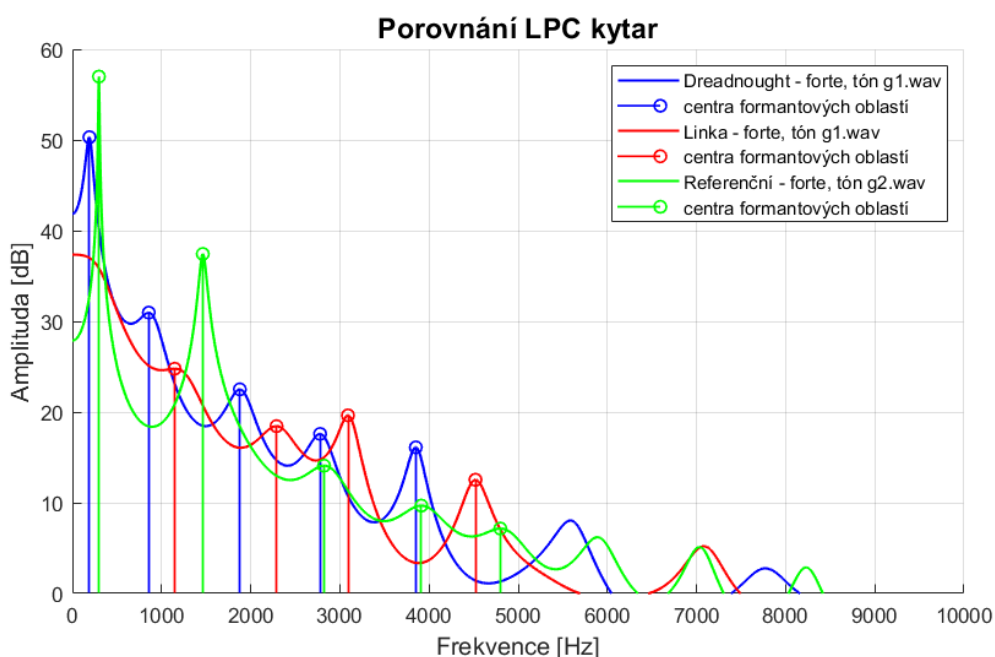
Obr. 5.3:2 Porovnání LPC kytar, tón a

Tab. 5:7 Porovnání formantových oblastí, tón a

	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	analyzovaný vzorek: a v 5. poloze								
formant	f ₁ [Hz]	L ₁ [dB]	šířka [Hz]	f ₂ [Hz]	L ₂ [dB]	šířka [Hz]	f ₃ [Hz]	L ₃ [dB]	šířka [Hz]
1.	525	30,98	-	2775	10,42	2117-3308	551	33,63	-
2.	1569	18,75	1169-1742	4564	9,59	4337-4902	2771	12,95	-
3.	2679	15,43	2484-2835	-	-	-	4024	9,98	3793-4186
4.	3796	15,23	3697-3884	-	-	-	-	-	-
5.	5182	9,62	5038-5332	-	-	-	-	-	-

5.3.3 Tón g1 – prázdná struna

U tónu *g1* se můžeme setkat s odchylkami od skutečných hodnot, jediná naladěná kytara byla linková. Ostatní dvě hráli tón o frekvenci 147 Hz, což odpovídá tónu *e1*. Na první pohled si všimneme referenční kytary, která má na 297 Hz (odpovídá frekvenci 2. harmonické) velmi úzký formant, podporuje mohutnost tónu. Dále pak oproti ostatním kytarám vyniká na frekvenci 1,4 kHz svým druhým formantem podporujícím nasalitu. U dalších formantů nebylo možno určit jejich šířky. Nezměřitelné byly také šířky prvních dvou formantů linkové kytary. Kytara Dreadnought má opět nejvíc formantů, jejich hodnotu se dočteme v tabulce 5:8.



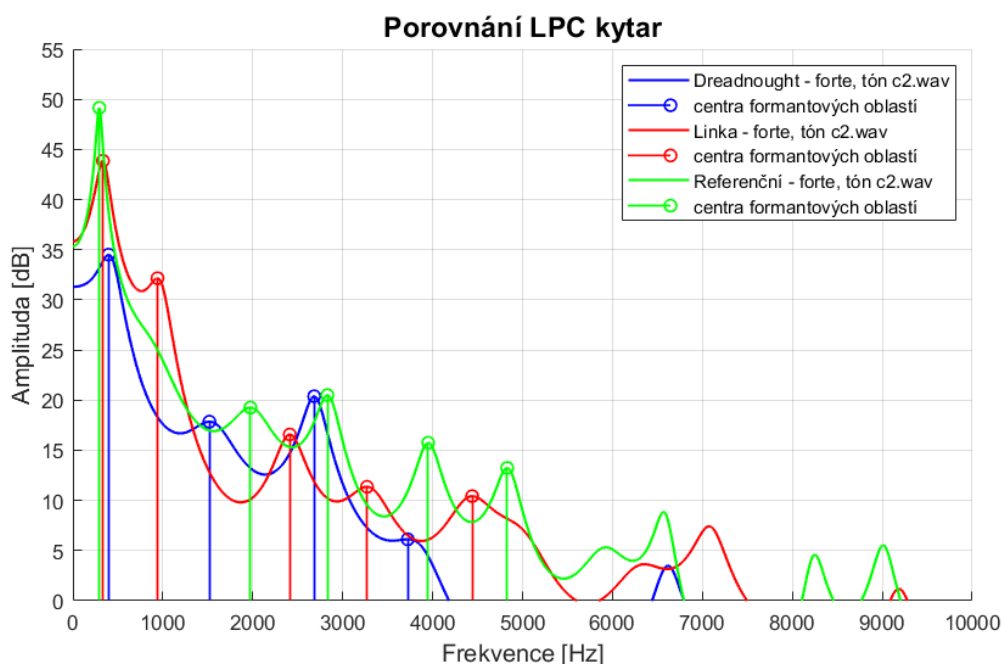
Obr. 5.3:3 Porovnání LPC kytar, tón g1

Tab. 5:8 Porovnání formantových oblastí, tón g1

formant	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	f_1 [Hz]	L_1 [dB]	šířka [Hz]	f_2 [Hz]	L_2 [dB]	šířka [Hz]	f_3 [Hz]	L_3 [dB]	šířka [Hz]
1.	191	50,31	143-228	1147	24,77	-	297	56,99	290-303
2.	856	30,96	-	2290	18,45	-	1463	37,43	1419-1510
3.	1878	22,50	1661-2036	3091	19,64	2936-3201	2822	14,09	-
4.	2778	17,59	2517-2940	4520	12,53	4370-4676	3914	9,69	-
5.	3851	16,11	3734-3954	-	-	-	4800	7,15	-
6.	5597	8,03	5314-5759	-	-	-	-	-	-

5.3.4 Tón c2 – 5. poloha

U tónu c2 se nachází formantová oblast s centrem mezi 294 a 396 Hz pro všechny tři kytary. U kytary Dreadnought je tento formant nejméně výrazný. Kytara má v tomto případě nejméně formantů, výrazný je ten s centrem na 2683 Hz – tón bude světlý a jasný. Absence formantů a případná nezměřitelnost jejich šířky znamená to, že tělo kytary tento tón příliš nepodpoří a nevzniká tolik harmonických složek ve vyšších pásmech jako u ostatních kytar.



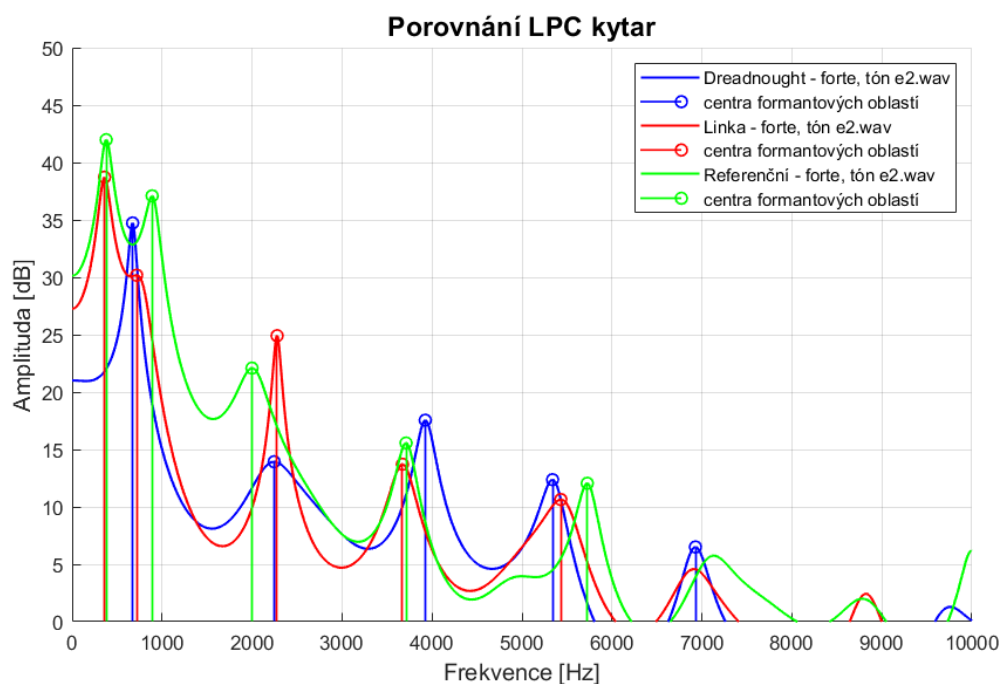
Obr. 5.3:4 Porovnání LPC kytar, tón c2

Tab. 5:9 Porovnání formantových oblastí, tón c2

	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	analyzovaný vzorek: c2 v 5. poloze								
formant	f ₁ [Hz]	L ₁ [dB]	šířka [Hz]	f ₂ [Hz]	L ₂ [dB]	šířka [Hz]	f ₃ [Hz]	L ₃ [dB]	šířka [Hz]
1.	396	34,51	113-510	345	43,88	229-411	294	49,15	253-330
2.	1518	17,85	-	940	32,16	-	1973	19,26	-
3.	2683	20,39	2528-2808	2411	16,58	2234-2591	2830	20,50	2653-2962
4.	3723	6,12	-	3271	11,36	-	3951	15,75	3800-4090
5.	-	-	-	4439	10,43	4134-4947	4829	13,24	4660-4961
6.	-	-	-	-	-	-	6560	8,827	6431-6666

5.3.5 Tón e2 – prázdná struna

V tomto případě se centra formantových oblastí nacházejí na podobných frekvencích. Rozdíl v barvě jednotlivých kytar bude odlišovat jejich hladina. Výrazným bodem je zde třetí formant linkové kytary (v tabulce uveden jako 2.), který ostatní převyšuje. Díky této oblasti bude mít kytara tón nejjasnější.



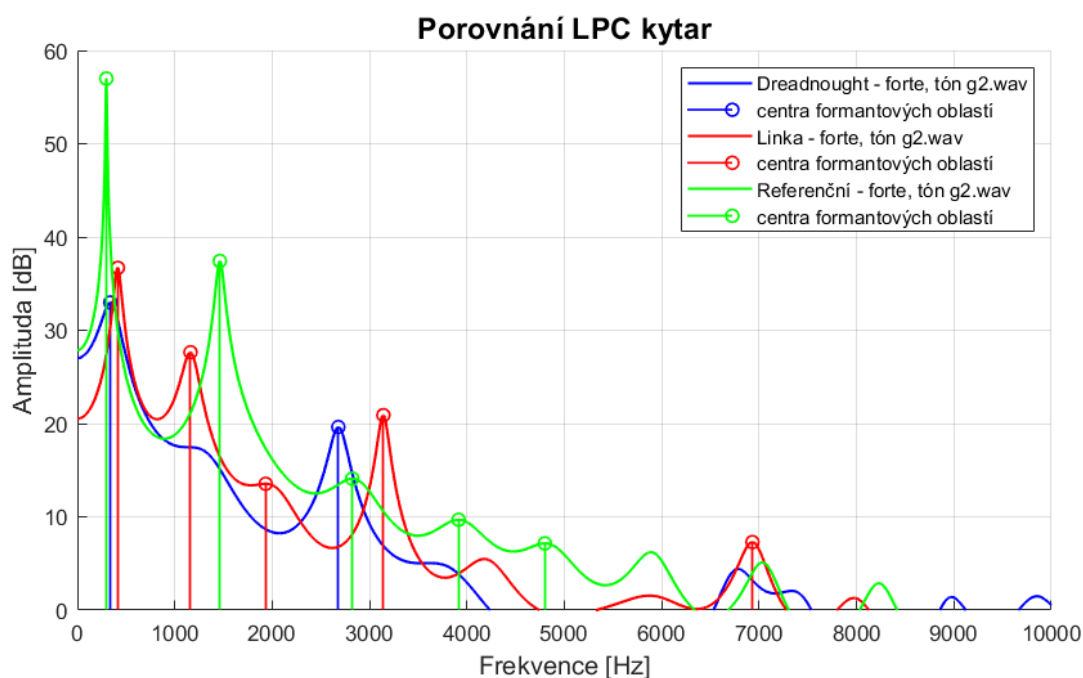
Obr. 5.3:5 Porovnání LPC kytar, tón e2

Tab. 5:10 Porovnání formantových oblastí, tón e2

	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	analyzovaný vzorek: <i>prázdná struna e2</i>								
formant	f ₁ [Hz]	L ₁ [dB]	šířka [Hz]	f ₂ [Hz]	L ₂ [dB]	šířka [Hz]	f ₃ [Hz]	L ₃ [dB]	šířka [Hz]
1.	672	34,73	624-716	360	38,72	292-433	378	41,99	316-448
2.	2245	13,93	1929-2624	2279	24,91	2231-2326	889	37,09	768-962
3.	3925	17,55	3812-4031	3671	13,71	3517-3815	1999	22,09	1764-2179
4.	5340	12,37	5178-5472	5432	10,64	5116-5630	3712	15,57	3590-3818
5.	6927	6,51	6780-7082	-	-	-	5726	12,06	5593-5836

5.3.6 Tón g2 – 12. poloha

U LPC analýzy jsem se rozhodla zahrnout zde také tón g2 hraný ve 12. poloze. Vidíme, že kytara Dreadnought má pouze dvě formantové oblasti, zatímco kytary menší jich mají 5. U referenční kytary měříme šířku oblastí pouze prvních dvou formantů, které podporují sytost a nasalitu. Kytara linková má tyto dva formanty blíže u sebe, navíc na frekvenci 3,1 kHz je další výrazný formant podporující světlost tónu.



Obr. 5.3:6 Porovnání LPC kytar, tón g2

Tab. 5:11 Porovnání formantových oblastí, tón g2

	Dreadnought			Yellow plus			referenční		
	analyzovaný vzorek: g2 ve 12. poloze								
	formant	f ₁ [Hz]	L ₁ [dB]	šířka [Hz]	f ₂ [Hz]	L ₂ [dB]	šířka [Hz]	f ₃ [Hz]	L ₃ [dB]
1.	338	32,98	206-416	415	36,69	379-458	297	56,99	290-303
2.	2679	19,62	2576-2782	1161	27,64	1058-1246	1463	37,43	1419-1507
3.	-	-	-	1933	13,54	-	2822	14,09	-
4.	-	-	-	3142	20,90	3080-3197	3914	9,69	-
5.	-	-	-	6931	7,29	6762-7085	4800	7,15	-

5.3.7 Shrnutí LPC analýzy

V průběhu hodnocení jednotlivých tónů jsme mohli zaregistrovat, jak se charakter lineární predikce jednotlivých kytar mění. Zatímco kytara Dreadnought měla při nižších frekvencích více a výraznější formanty, při vyšších frekvencích o ně přicházela. Je to dáno

velikostí jejího těla, které je oproti ostatním kytarám větší a podporuje hlubší tóny. U linkové a referenční kytary tomu bylo přesně naopak – zpočátku bylo formantů pomálu, a navíc byly méně výrazné, s narůstající frekvencí pak docházelo ke zvětšování hladin jejich center.

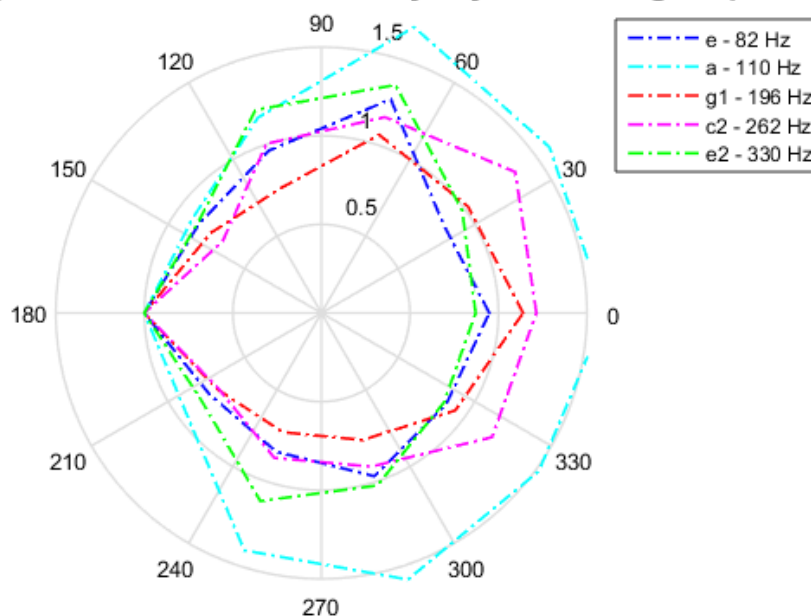
5.4 Směrové vyzařování

Následující kapitola obsahuje směrovosti nástrojů v jednotlivých dynamikách. Hráč byl otočen na polohu 0, tzn. že mikrofon ve 180 ° mířil přímo na hráčova záda. Jelikož poloměr kruhu, ve kterém byly mikrofony umístěny, byl pouze 1 metr, mělo to za následek to, že ve všech případech zaznamenal tento zadní mikrofon stejnou hodnotu. Na zobrazených polárních grafech mají vrstevnice krok 30 dB.

5.4.1 Kytara dreadnought

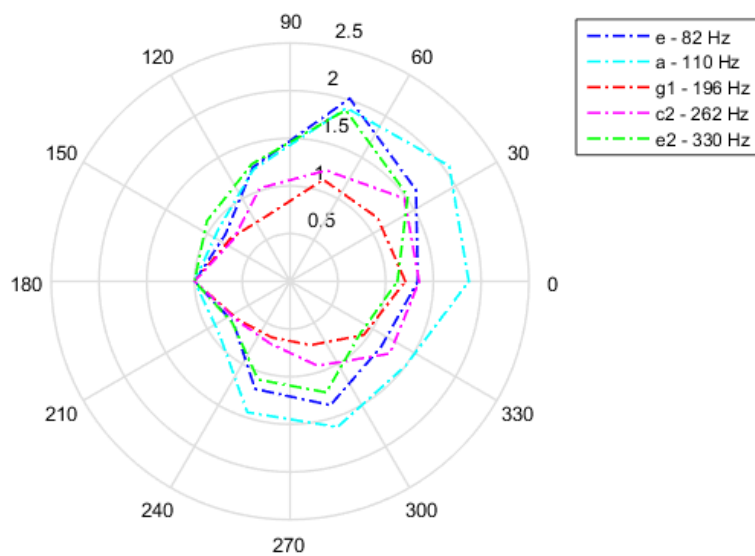
Můžeme si všimnout, že ve všech dynamikách je směrovost jednotlivých tónů velmi podobná. V pianu je směrovost souměrná do obou stran. Při mezzoforte vidíme rozdíl u tónů *e* a *e2*, kdy je větší intenzita zaznamenána na levé straně, tedy v 72 °.

Směrová vyzařovací charakteristika kytary dreadnought - piano



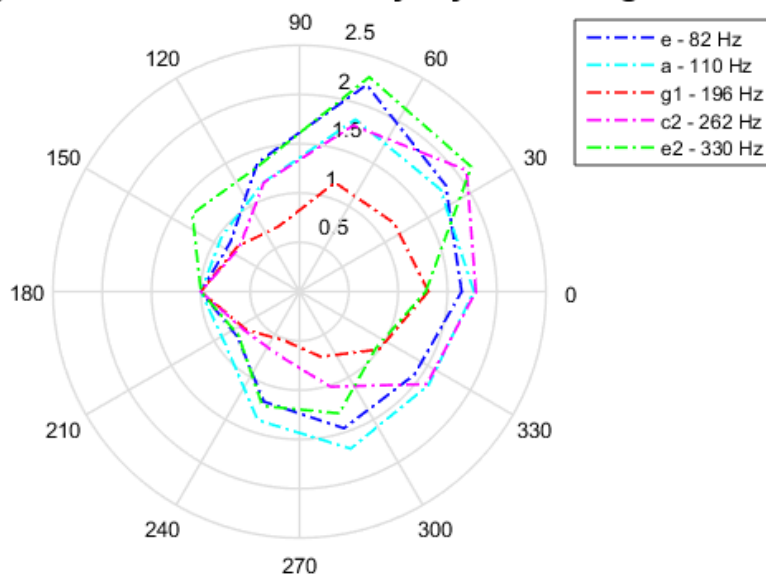
Obr. 5.4:1 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, piano

Směrová vyzařovací charakteristika kytary dreadnought - mezzoforte



Obr. 5.4:2 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, mezzoforte

Směrová vyzařovací charakteristika kytary dreadnought - forte

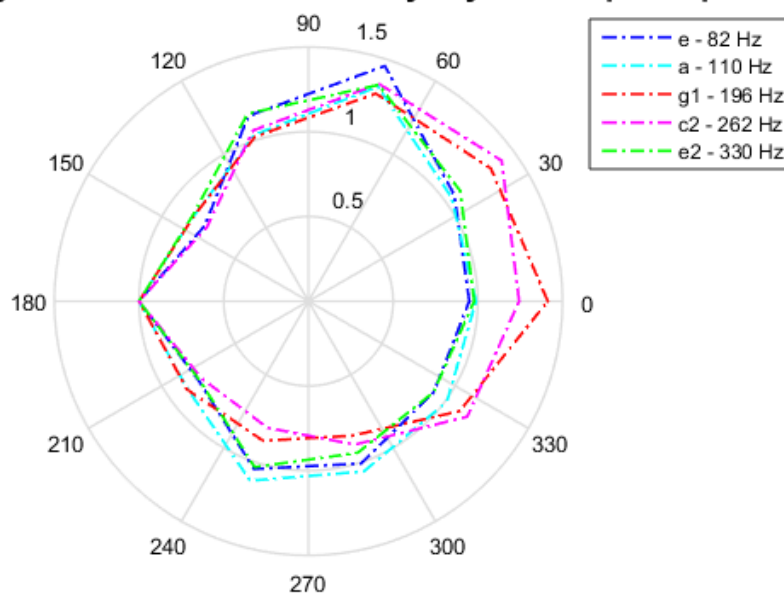


Obr. 5.4:3 Směrová vyzařovací charakteristika kytary Dreadnought, forte

5.4.2 Kytara Yellow plus

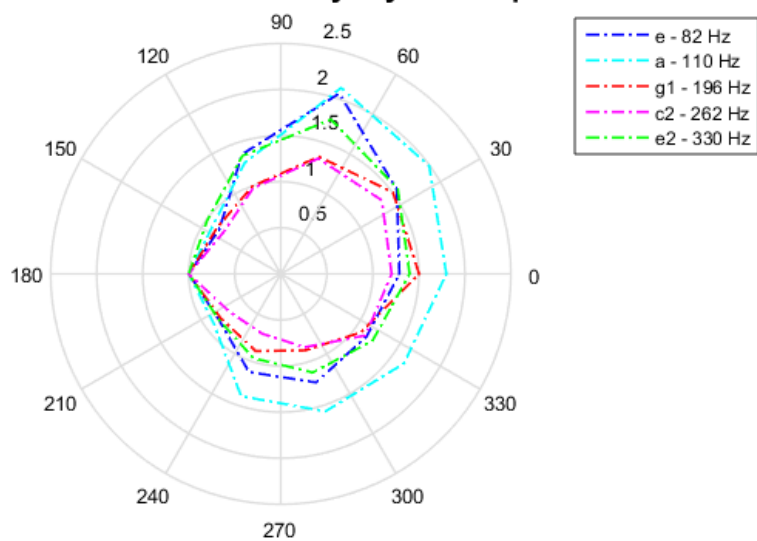
U druhé kytary je tomu dost podobně, při dynamikách piano a mezzoforte je směrnost vyvážená na obou stranách, v dynamice forte je to opět směřováno na levou stranu. Až na tón *a*, který je ve všech dynamikách vyrovnaný a netvoří žádné laloky. Tóny *e* a *e2* opět směřují spíše na levou stranu, tedy přes krk kytary.

Směrová vyzařovací charakteristika kytary Yellow plus - piano



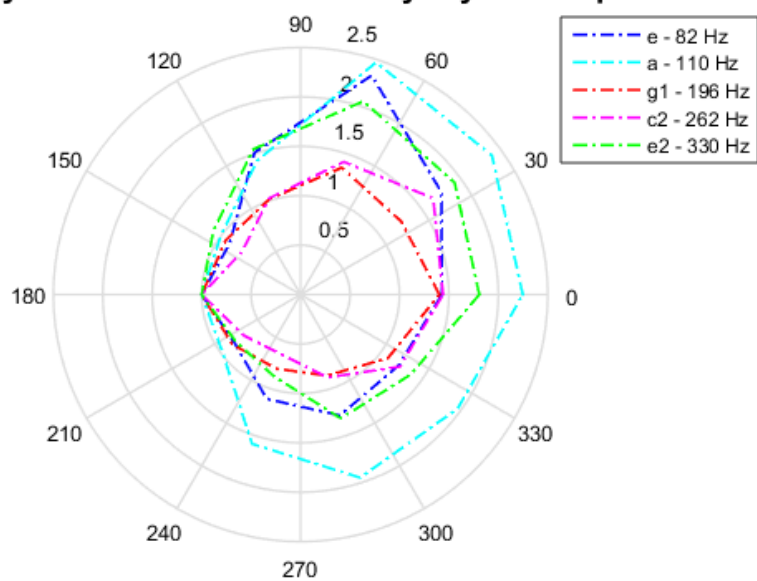
Obr. 5.4:4 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, piano

Směrová vyzařovací charakteristika kytary Yellow plus - mezzoforte



Obr. 5.4:5 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, mezzoforte

Směrová vyzařovací charakteristika kytary Yellow plus - forte

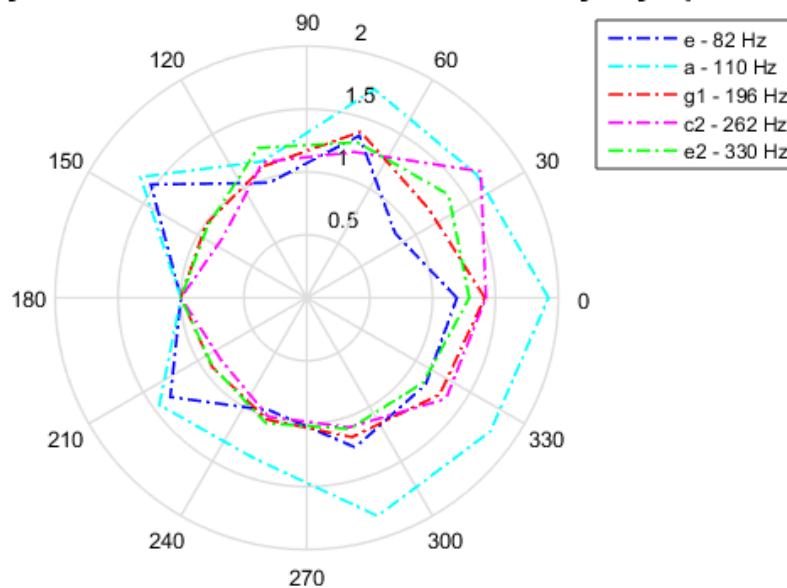


Obr. 5.4:6 Směrová vyzařovací charakteristika linkové kytary, forte

5.4.3 Referenční kytara

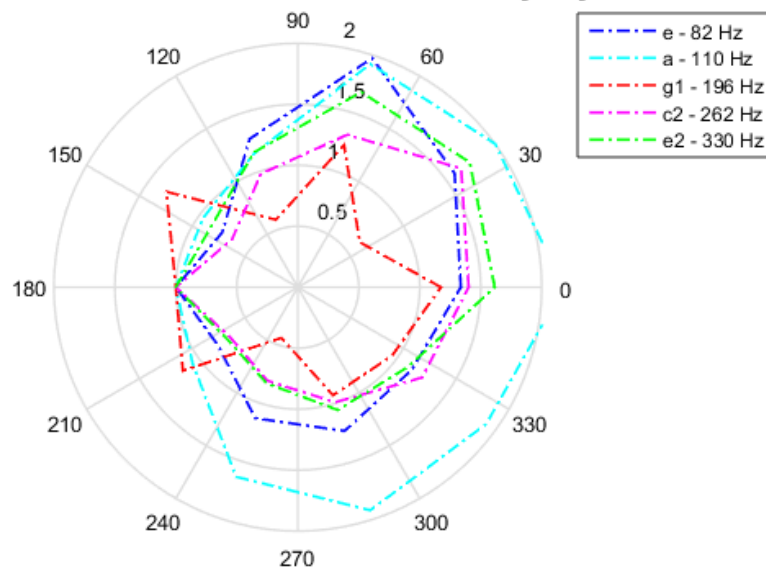
Referenční kytara je oproti předchozím odlišná. V dynamikách piano se tvoří laloky směrem dozadu u tónů *e* a *a*, u mezzoforte tomu tak je u tónu *g1*. Všechny zmíněné tóny mají nevyrovnanou směrovost a vytváří laloky. Nejlépe to můžeme vidět u tónu *a* v mezzoforte. Ve forte tyto laloky zmizí a směrovost je souměrná, úměrná směru hraní.

Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary - piano



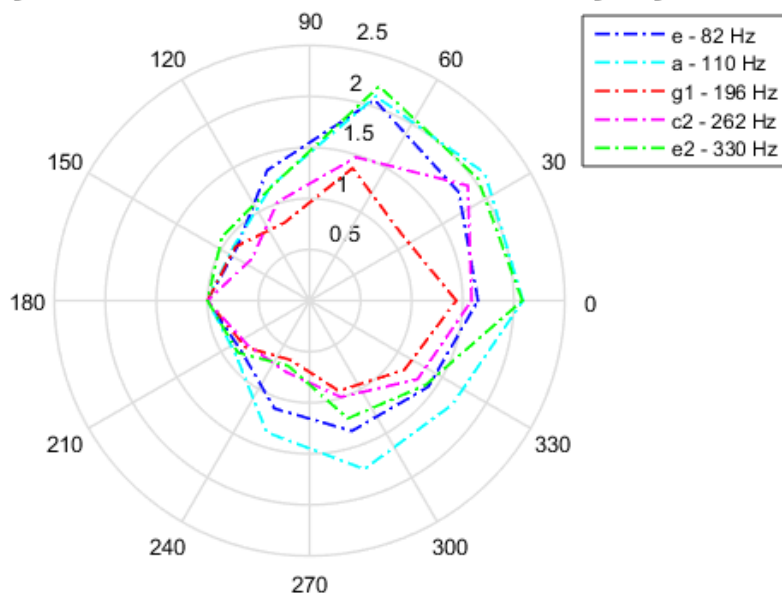
Obr. 5.4:7 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, piano

Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary - mezzoforte



Obr. 5.4:8 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, mezzoforte

Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary - forte



Obr. 5.4:9 Směrová vyzařovací charakteristika referenční kytary, forte

6 HLEDÁNÍ MÓDŮ KYTAR

Podle literatury [16] očekáváme u kytary následující módy: přední deska, zadní deska, žebroví, krk, vzduch v těle kytary a struny. Největší vliv na výslednou barvu má zadní deska spolu s žebrovím, protože ovlivňují střední kmitočty, které lidské ucho nejvíce zaznamenává. Krk dodává tónu největší jasnost. Objem skříně potom tónu dodává jakousi údernost vyzařující z ozvučnice. Přední deska má dva důležité módy mezi frekvencemi 100–280 Hz. Představují rezonance vzdušného objemu a vlastní ozvučné skříně kytary. Mohou být v oktávovém vztahu. [2]

Abychom jednotlivé módy našli, součástí měření bylo tlumení částí kytar. V této kapitole najdeme rozbor těchto módů u kytar Dreadnought a referenční pomocí LPC analýzy, Chladniho obrazců a porovnání FFT kompletně zatlumeného nástroje s nástrojem nezatlumeným. Přiloženy jsou zde také použitelné (nerozmazané) fotky z měření zatlumování.

Zatlumením pouze části kytary může dojít k tomu, že dojde k posunu módu, nebo dokonce k vybuzení módu nového. Chladniho obrazce se mohly budít na mírně odlišných frekvencích, než tomu je u formantových oblastí z bezodrazové komory. Přece jen srovnáváme dvě situace, kdy v jedné docházelo k rezonanci desek při drnknutí na strunu trsátkem a ve druhé rezonanci zajistil reproduktor.

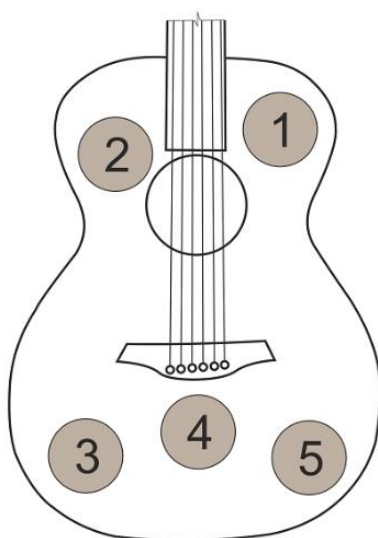
6.1 Referenční kytara

Následující fotografie ukazují, jak probíhalo měření tlumení referenční kytary – na jakých místech a jak se tlumilo. Fotografie vznikaly před samotným nahráváním tónu, proto na některých fotografiích není kytara správně vycentrovaná nebo „tlumič“ nevykazuje maximální snahu o nevytváření akustického stínu. Na poslední fotografii je tato situace více než patrná.



Obrázek 6.1:1 Fotografie z měření referenční kytary, postupně: tlumení zadní desky; lokální tlumení přední desky; tlumení celé přední desky; tlumení celé kytary

Na obrázku 6:2 vidíme zobrazena přibližná místa tlumení přední desky.



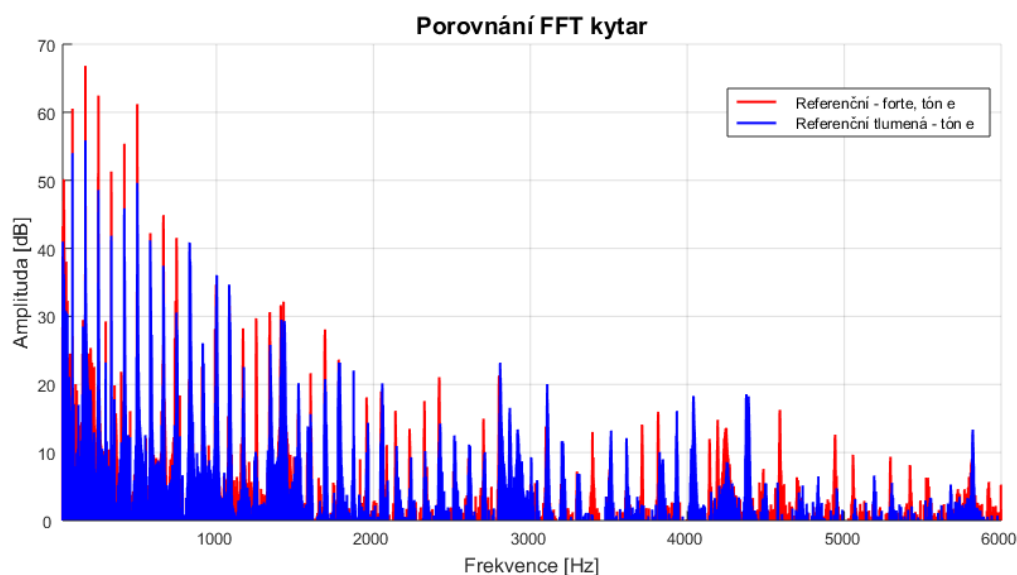
Obrázek 6.1:2 Místa zatlumení přední desky referenční kytary

6.1.1 Tón e

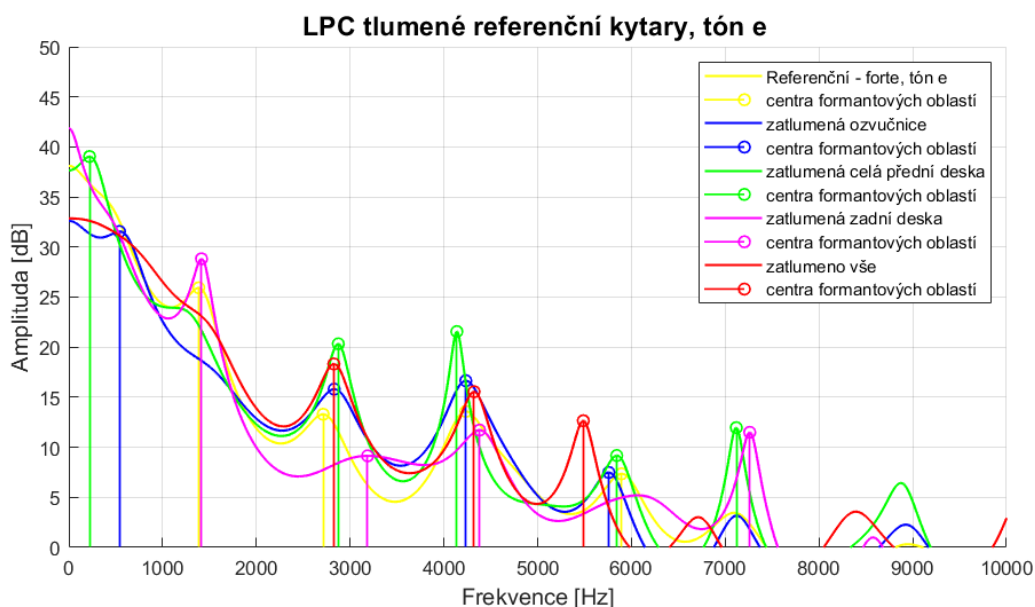
Ve spektru vidíme, že tlumením došlo k poklesu hladin jednotlivých harmonických složek, v prvním pásmu zhruba o 6-15 dB. Pouze v oblasti 1,0-1,3 kHz a 3 kHz k výraznější změně nedošlo. Při pohledu do grafu č. 6.1:4 vidíme, že zde kytara má formantové oblasti. Kolem 1,3 kHz dochází k rezonanci zadní desky, čímž tyto frekvence podporuje. Naopak

ve 3 kHz u ní dochází k tlumení. Tam ovšem dochází k rezonanci vzduchu uvnitř skříně a také přední desky. Při zatlumení zadní i přední desky došlo v důsledku předpětí na deskách ke vzniku nového formantu v okolí 7,3 kHz.

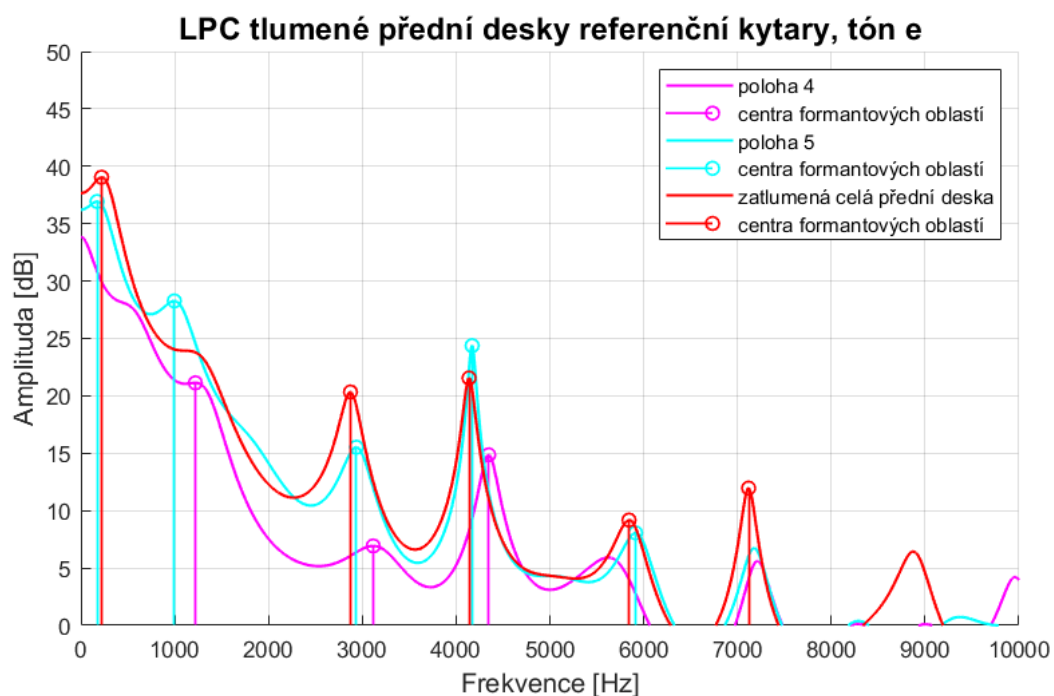
Na přední desce mělo největší vliv místo č. 4, jehož zatlumením došlo k největšímu poklesu hladin formantových oblastí, zvláště do frekvence 3,5 kHz. V grafu xy vidíme, že přední deska také podporuje frekvence kolem 4,1 kHz. Za toto zesílení může převážně místo č. 5.



Obrázek 6.1:3 Rozdíl FFT spektra referenční kytary při tlumení, tón e



Obrázek 6.1:4 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst referenční kytary, tón e



Obrázek 6.1:5 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky referenční kytary, tón e

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, na přední desce najdeme 2 rezonanční módy. První z nich se nachází na kmitočtu 107 Hz. Měření Chladniho obrazců potvrdilo rezonanci zadní desky při frekvenci 80 Hz, tón e má frekvenci 82 Hz.



Obrázek 6.1:6 Mód na přední desce ref. kytary při $f=107$ Hz

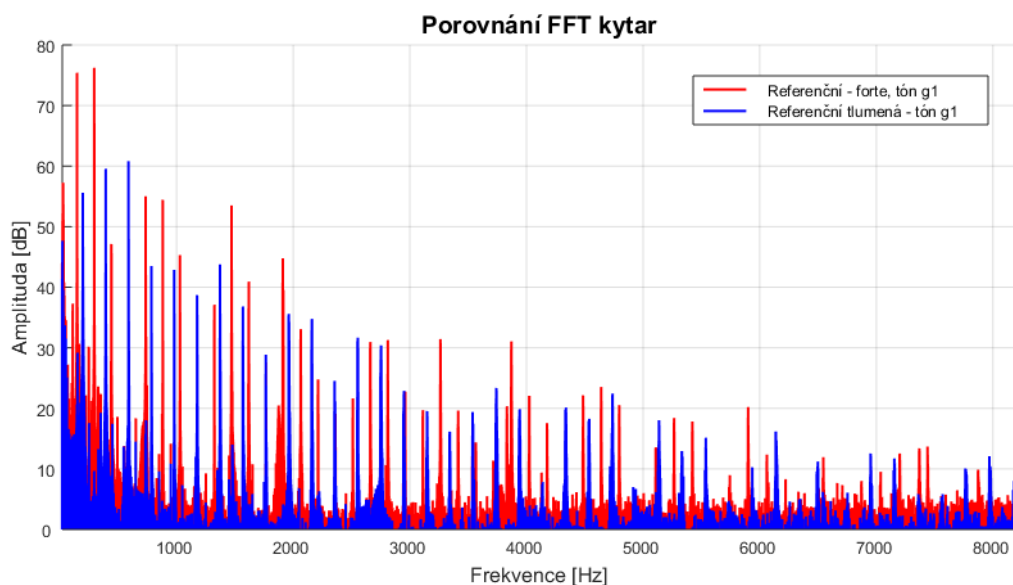


Obrázek 6.1:7 Mód na zadní desce ref. kytary při $f=80$ Hz

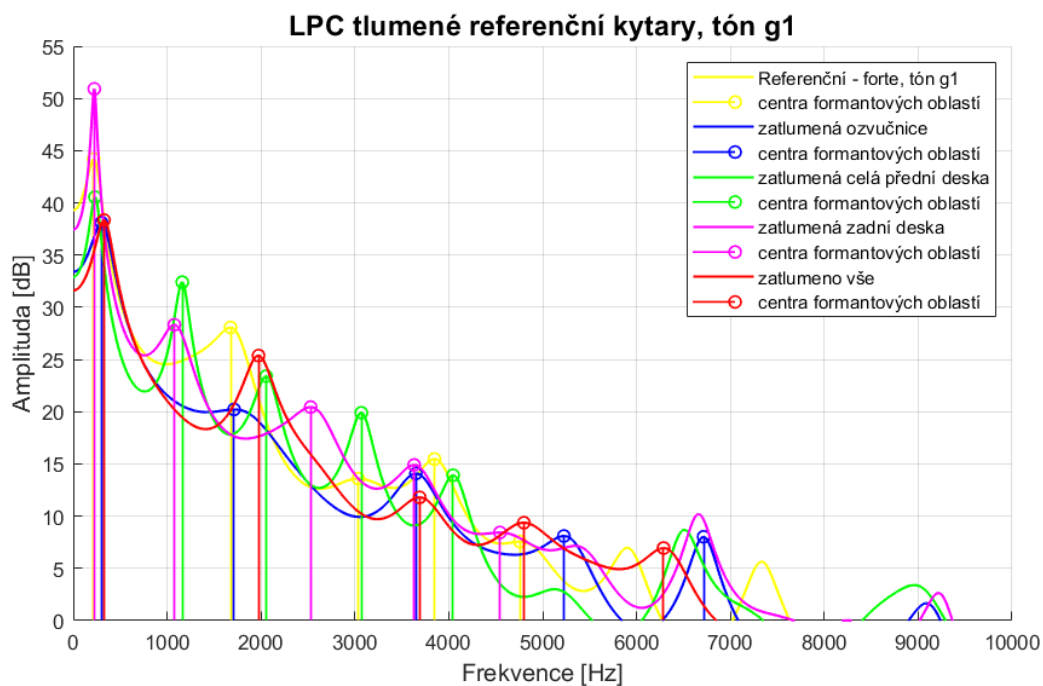
6.1.2 Tón g1

Tento tón bohužel byl z části změřen rozladěný, proto v porovnání FFT nejsou harmonické složky na stejných místech. Naladění proběhlo před měřením se zatlumenými částmi, tzn. LPC grafy odpovídají tónu g1 o frekvenci 195 Hz. Přesto vidíme, že utlumením kytary došlo k poklesu 1. a 2. harmonické o téměř 20 dB. 3. harmonická naopak o 15 dB posílila. V grafu porovnání LPC vidíme v oblasti 2.-3. harmonické úzké formantové oblasti. Největší změnu v barvě v tomto případě způsobilo zatlumení ozvučnice. Zatlumením zadní desky došlo k podpoření prvního formantu.

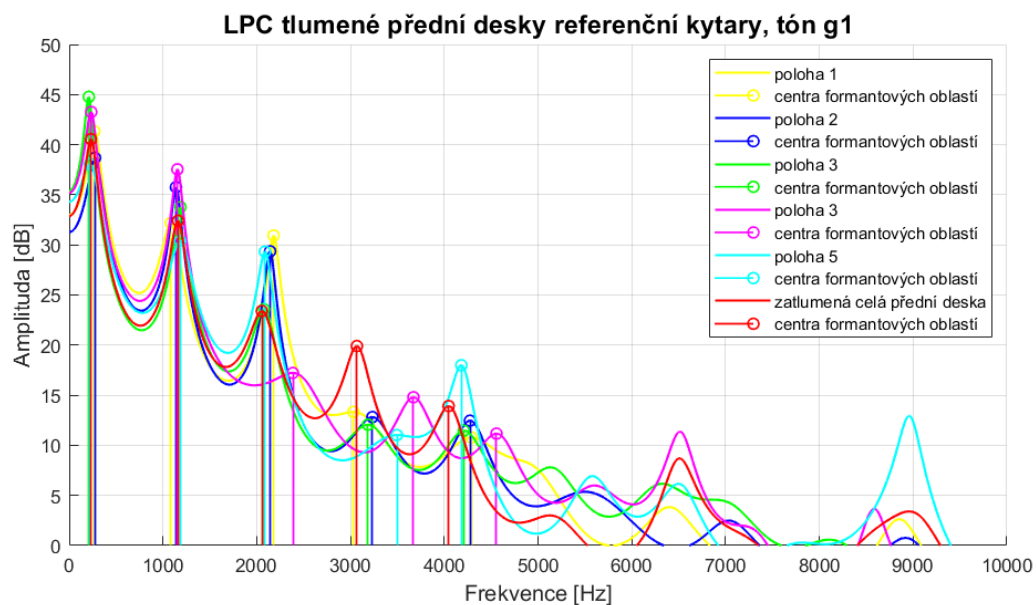
Co se týče zkoumání přední desky, vidíme LPC analýzu v grafu 6.1:10. První 3 formantové oblasti jsou pro všechna místa téměř stejná, hodnoty se rozcházejí až od 3 kHz. Oproti utlumení celé kytary dochází k posílení složek kolem frekvence 1,1 a 3 kHz.



Obrázek 6.1:8 Rozdíl FFT spektra referenční kytary při tlumení, tón g1



Obrázek 6.1:9 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst referenční kytary, tón g1



Obrázek 6.1:10 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky referenční kytary, tón g1

Měřením Chladniho obrazců byl při frekvenci 197 Hz objeven obrazec na obrázku. Ve 216 Hz se uzly pod kobylkou více projeví a posunuly se blíže ke kobylce. Tento kmitočet odpovídá v předchozím grafu prvnímu formantu. Navíc se jedná o druhý očekávaný mód přední desky z pásma 100-280 Hz.



Obrázek 6.1:11 Mód na přední desce ref. kytary při $f=197$ Hz



Obrázek 6.1:12 Mód na přední desce ref. kytary při $f=216$ Hz

Na zadní desce byly objeveny podobné obrazce. Při 188 Hz je to obrazec nahoře, při zvýšení na 197 Hz se rozvibrovala téměř celá deska, až na její spodní část.



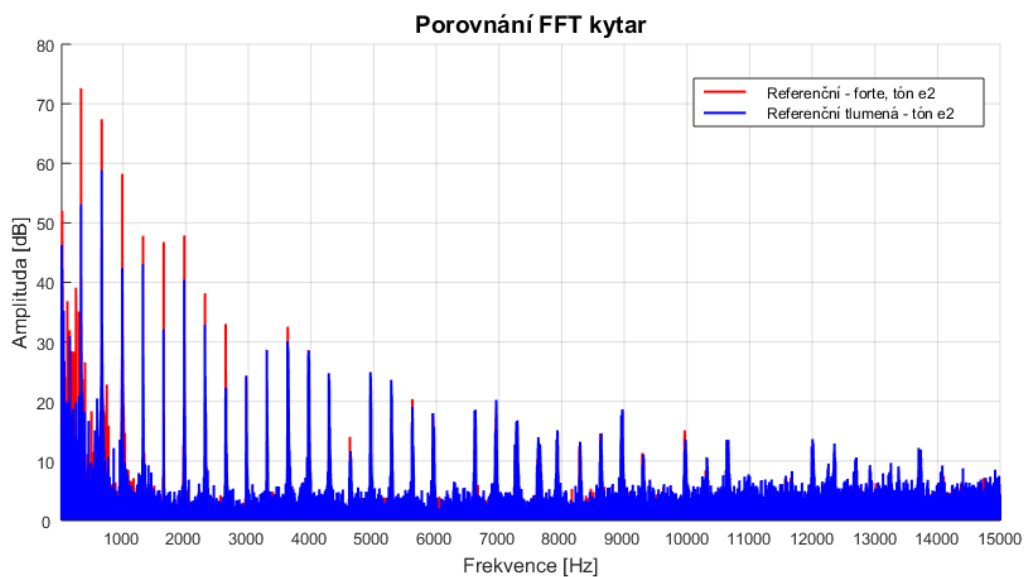
Obrázek 6.1:13 Mód na zadní desce ref. kytary při $f=188$ Hz



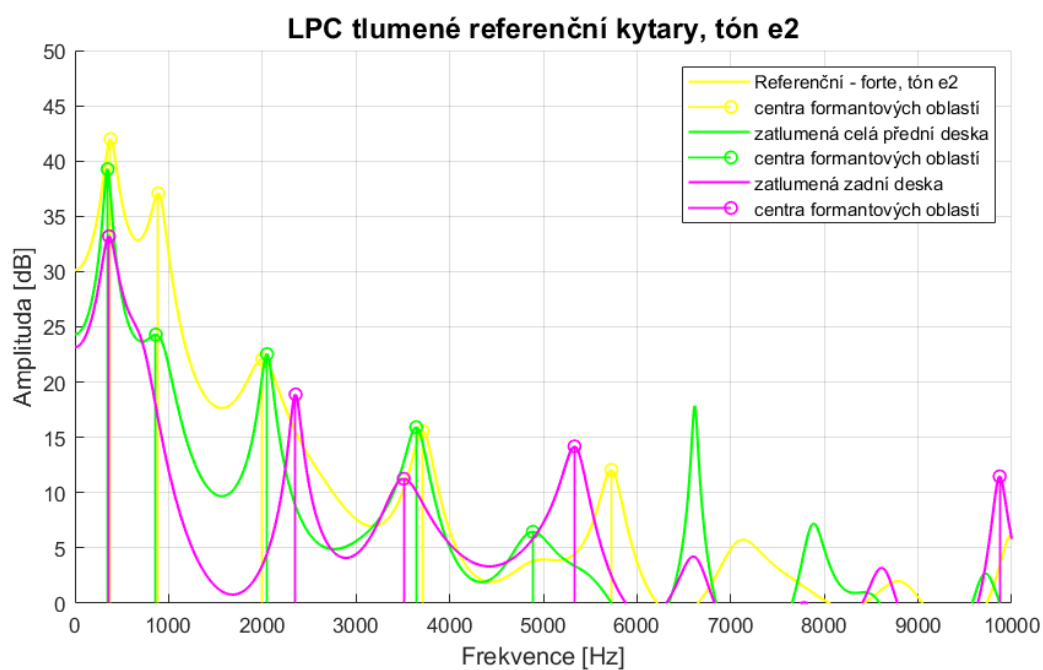
Obrázek 6.1:14 Mód na zadní desce ref. kytary při $f=197$ Hz

6.1.3 Tón e2

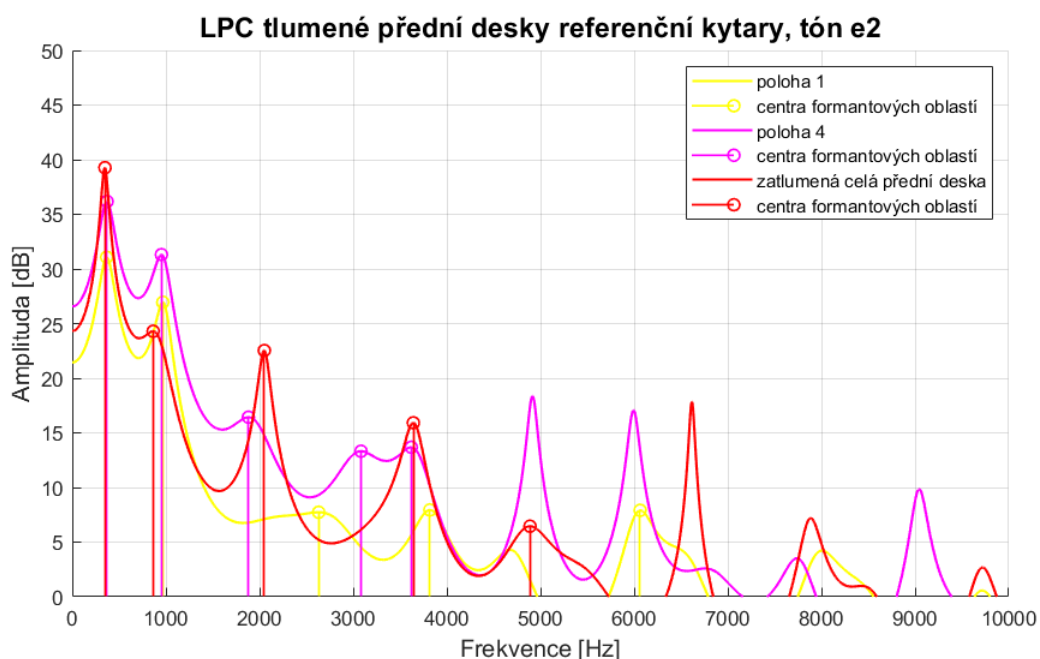
U tónu e2 došlo ke změně v první pásmu spektra. Liché složky jsou utlumeny o přibližně 15 dB více než sudé složky. Při zatlumení zadní desky se na frekvenci 1,6 kHz vytvořil antiformant – došlo k téměř úplnému zatlumení dané frekvence. Na přední desce v místě č. 1 došlo ke snížení intenzity složek na frekvenci od 1,7 kHz. Oproti tomu při zatlumení místa č. 4 došlo k podpoření této části spektra, navíc na 5 a 6 kHz vznikly další formanty.



Obrázek 6.1:15 Rozdíl FFT spektra referenční kytary při tlumení, tón e2

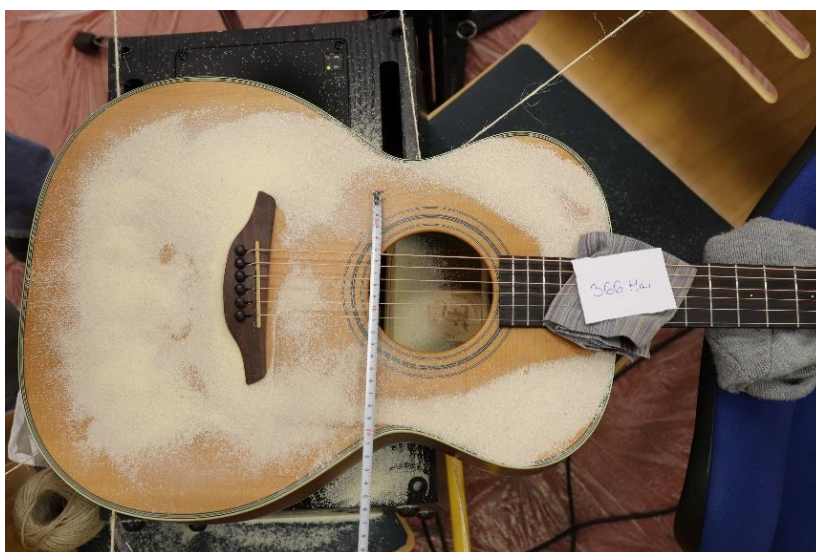


Obrázek 6.1:16 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst referenční kytary, tón e2



Obrázek 6.1:17 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky referenční kytary, tón e2

Na místě první formantové oblasti přední a zadní desky byly nafoceny tyto obrazce. Kmitny přední desky se nachází v okolí ozvučnice a na krajích spodní části. Nad touto frekvencí nebyly na přední desce nalezeny žádné další obrazce.



Obrázek 6.1:18 Mód na přední desce ref. kytary při $f=366$ Hz

U zadní desky při frekvenci 360 Hz kmitají pouze kraje. Při dalším zvyšování frekvence vypadají obrazce podobně, navíc se tam tvoří oblast kmiten nad ozvučnicí.



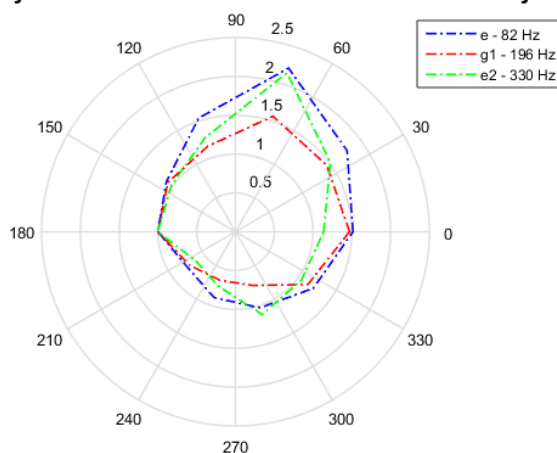
Obrázek 6.1:19 Mód na zadní desce ref. kytary při $f=360$ Hz



Obrázek 6.1:20 Mód na zadní desce ref. kytary při $f=449$ Hz

Ve směrovosti se tlumení projevilo na straně skříně kytary – na této straně došlo ke snížení intenzity. Když jsme utlumili skříň, nedocházelo k takové rezonanci jako při netlumené kytarě. Energie si tedy našla cestu přes krk kytary.

Směrová vyzařovací charakteristika tlumené referenční kytary



Obrázek 6.1:21 Směrovost tlumené referenční kytary

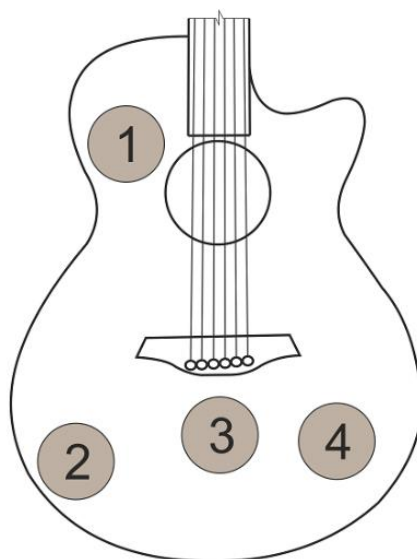
6.2 Kytara dreadnought

Následující fotografie ukazují, jak probíhalo měření tlumení kytary Dreadnought – na jakých místech a jak se tlumilo. Stejně jako u předchozí kytary – fotografie vznikaly před samotným nahráváním tónu, proto na některých fotografiích není kytara správně vycentrována nebo „tlumič“ nevykazuje maximální snahu o nevytváření akustického stínu.



Obrázek 6.2:1 Fotografie z měření kytary Dreadnought, postupně: lokální tlumení přední desky, tlumení celé přední desky, zatlumení ozvučnice

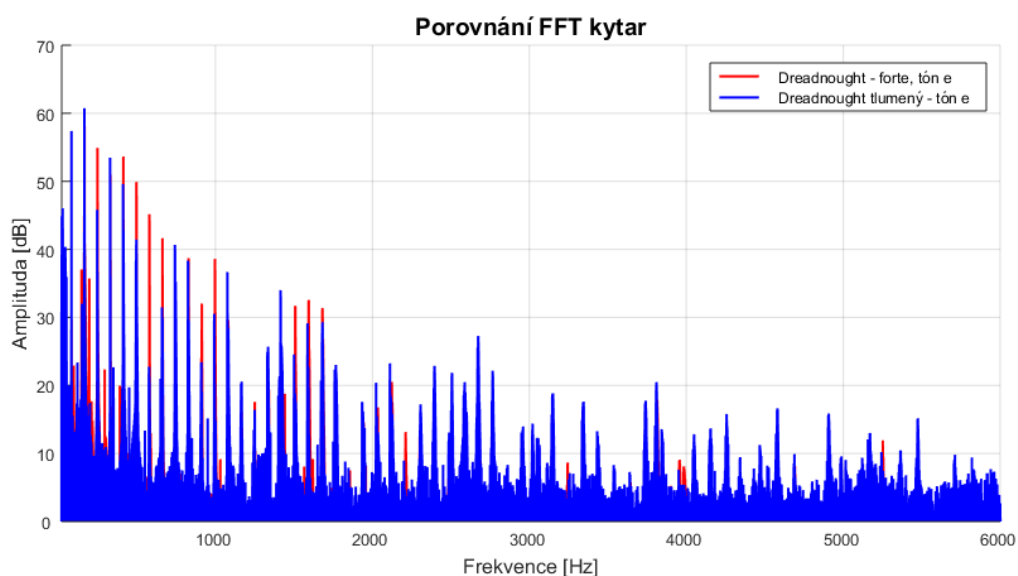
Na obrázku 6.2:2 vidíme přibližná místa tlumení přední desky.



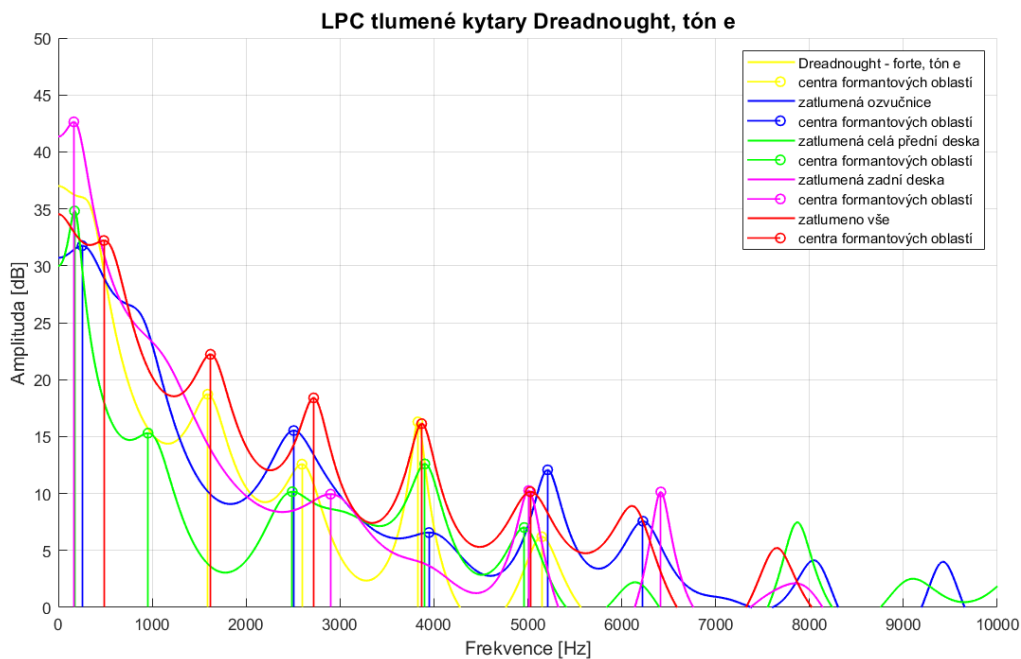
Obrázek 6.2:2 Místa zatlumení přední desky referenční kytary

6.2.1 Tón e

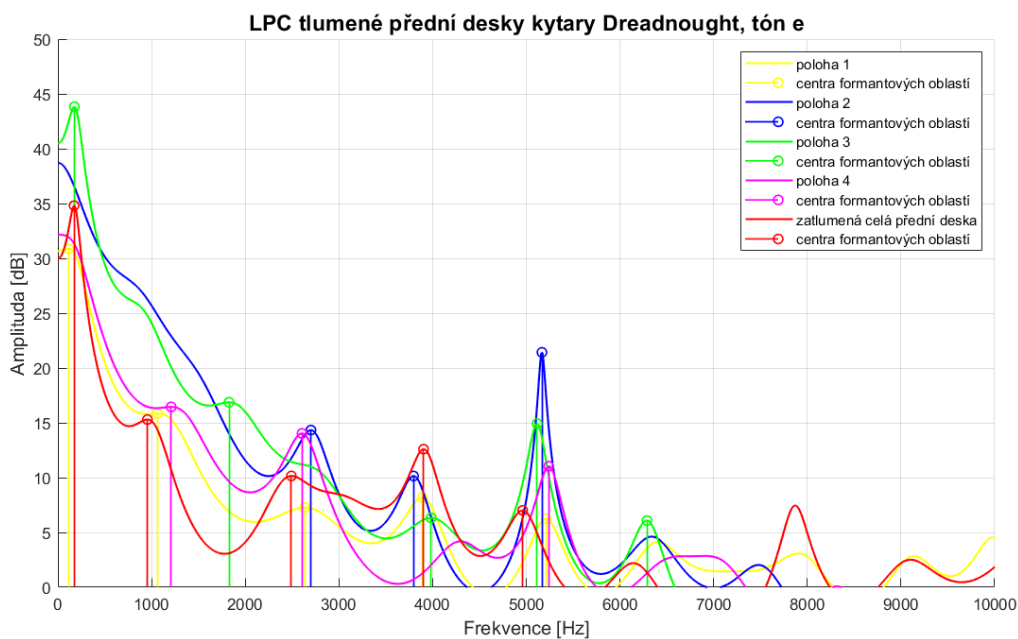
Ve spektru vidíme, že zatlumení mělo největší vliv na sedmou harmonickou, ta se zmenšila zhruba na polovinu. Tón zatlumením ztratil především brysknost. Také přišel o dutost a částečně o jas. Na nosnost a mohutnost zatlumení nemělo vliv, stejně jako na složky ve vyšších pásmech. Co se týká formantových oblastí jednotlivých zatlumených míst, největší vliv na barvu mělo zatlumení přední desky. V oblasti kolem 5,1 kHz se při tlumení přední desky nachází formantová oblast, největší intenzitu má při zatlumení místa č.2. Při zatlumení tohoto místa opět došlo k vybuzení jiného místa na desce, proto takový rozdíl.



Obrázek 6.2:3 Rozdíl FFT spektra kytary Dreadnought při tlumení, tón e



Obrázek 6.2:4 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst kytary Dreadnought, tón e



Obrázek 6.2:5 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky kytary Dreadnought, tón e

Na přední desce byly objeveny tyto rezonanční módy. Vidíme, že v poloze č. 1 se nacházejí v obou případech uzly. Při frekvenci 94 Hz dochází k rezonanci desky hlavně pod kobyolkou, zatímco při 202 Hz (frekvence blízká tónu g1) rezonuje téměř celá deska.



Obrázek 6.2:6 Mód na přední desce kytary Dreadnought při $f=94$ Hz



Obrázek 6.2:7 Mód na přední desce kytary Dreadnought při $f=202$ Hz

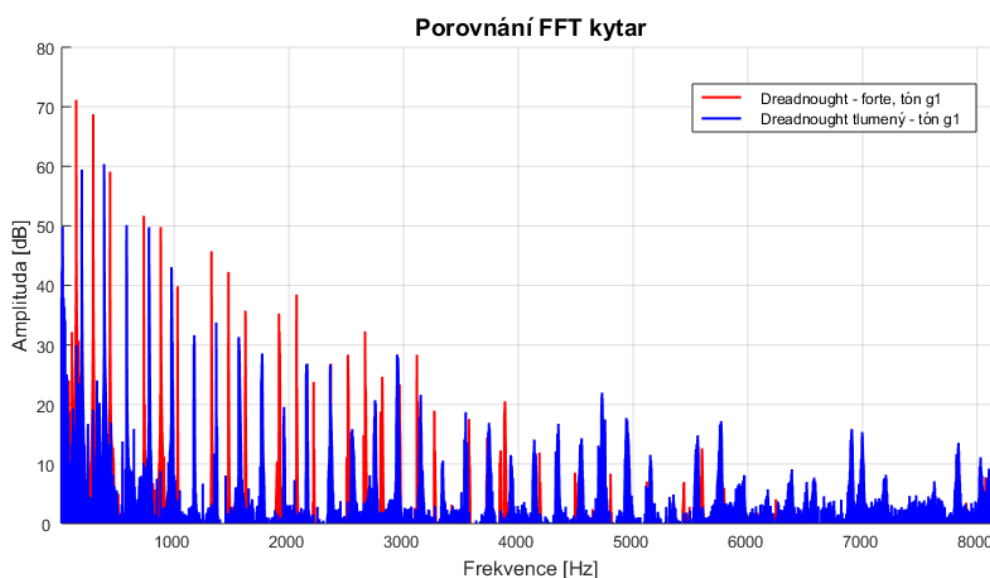
Na zadní desce na stejných kmitočtech nalezneme také Chladniho obrazce. Mají podobný charakter – uzly se hromadí po obvodu kytary. Při vyšší frekvenci je oblast kmíten menší.



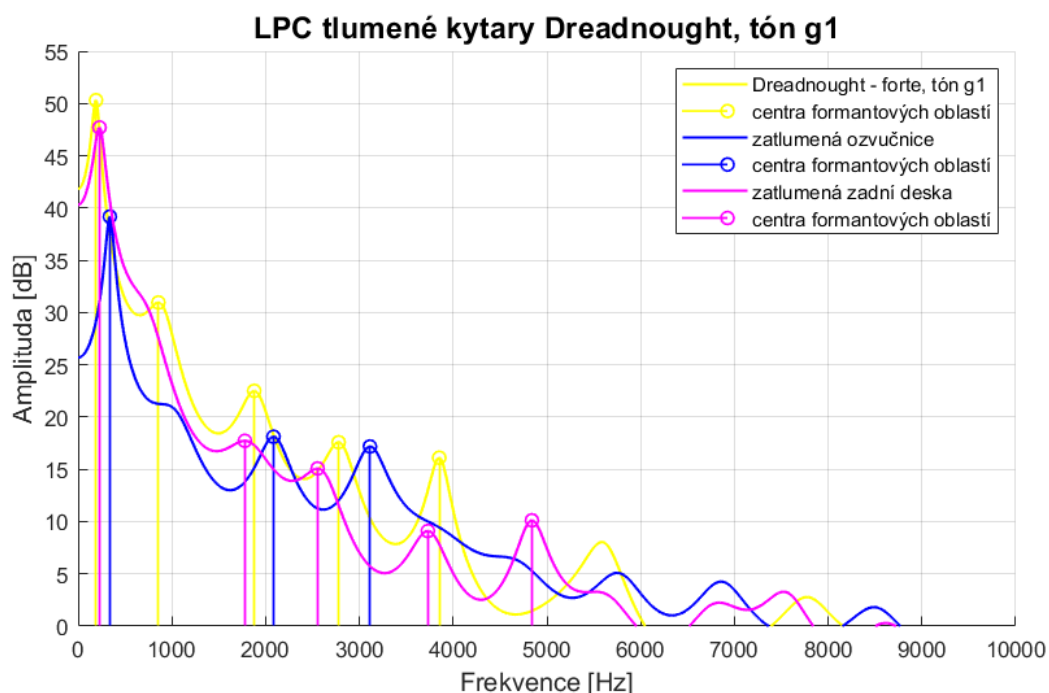
Obrázek 6.2:8 Mód na zadní desce kytary Dreadnought při $f=94$ Hz (vlevo) a $f=200$ Hz (vpravo)

6.2.2 Tón g1

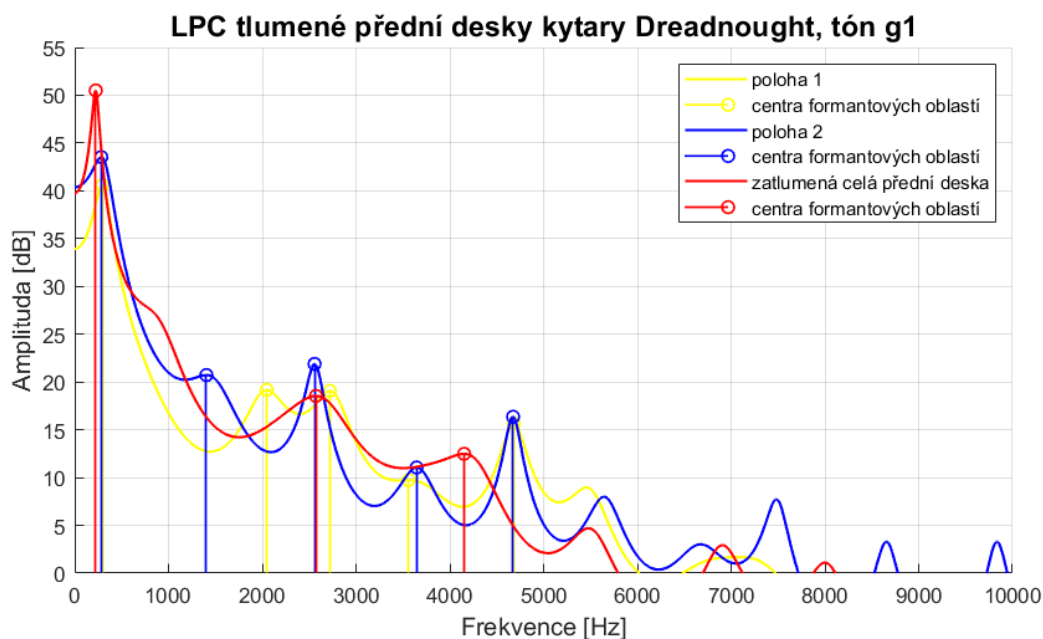
Tón *g1* byl bohužel tím rozladěným, to se projevilo posunem celého spektra (na měření tlumení jsme kytaru naladili). Tento tón přišel se zatlumením jak o nosnost, tak o mohutnost. Všechny složky na své hlasitosti ztratily, až na čtvrtou – barva zůstala jasná. U kytary Dreadnought bylo při tomto tónu nalezeno až 6 formantů pro jeden vzorek. Největší vliv má zatlumení ozvučnice, které mimo jiné posune i první formant z 224 Hz na 338 Hz. Dále také zatlumení zadní desky – formanty zůstávají na stejných frekvencích, snížila se jejich intenzita. Co se týče přední desky, mají tentokrát všechna místa stejný první formant na 285 Hz. Nejužší oblasti potom detekujeme při zatlumení místa č.2.



Obrázek 6.2:9 Rozdíl FFT spektra kytary Dreadnought při tlumení, tón g1



Obrázek 6.2:10 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst kytary Dreadnought, tón g1

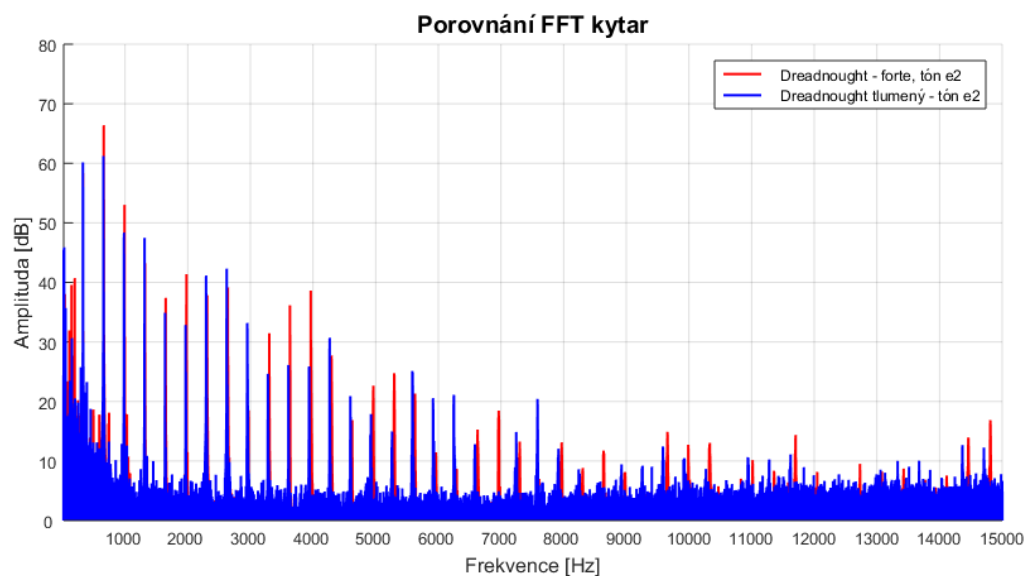


Obrázek 6.2:11 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky kytary Dreadnought, tón g1

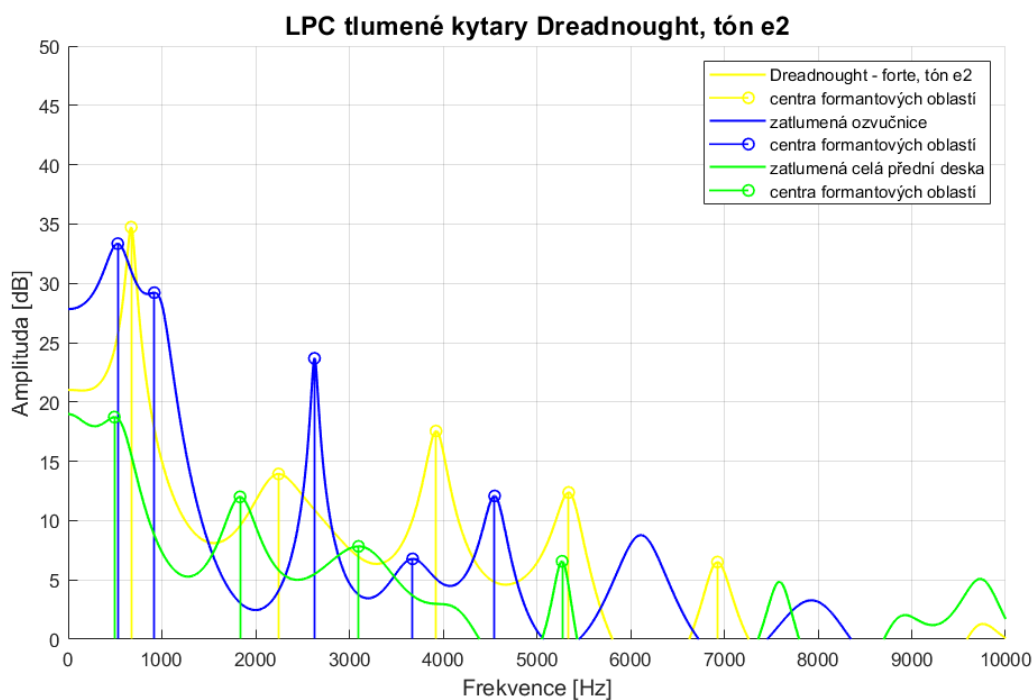
6.2.3 Tón e2

U tónu *e2* nejsou rozdíly ve spektru po zatlumení tak výrazné. U sedmé a osmé harmonické došlo dokonce k nárůstu hlasitosti. Výraznější změny jsou v druhém pásmu spektra. Na 2,6 kHz se nachází úzké, leč výrazná formantová oblast při zatlumení ozvučnice. Výraznou změnu v barvě tento tón utrpěl po zatlumení přední desky. Tentokrát

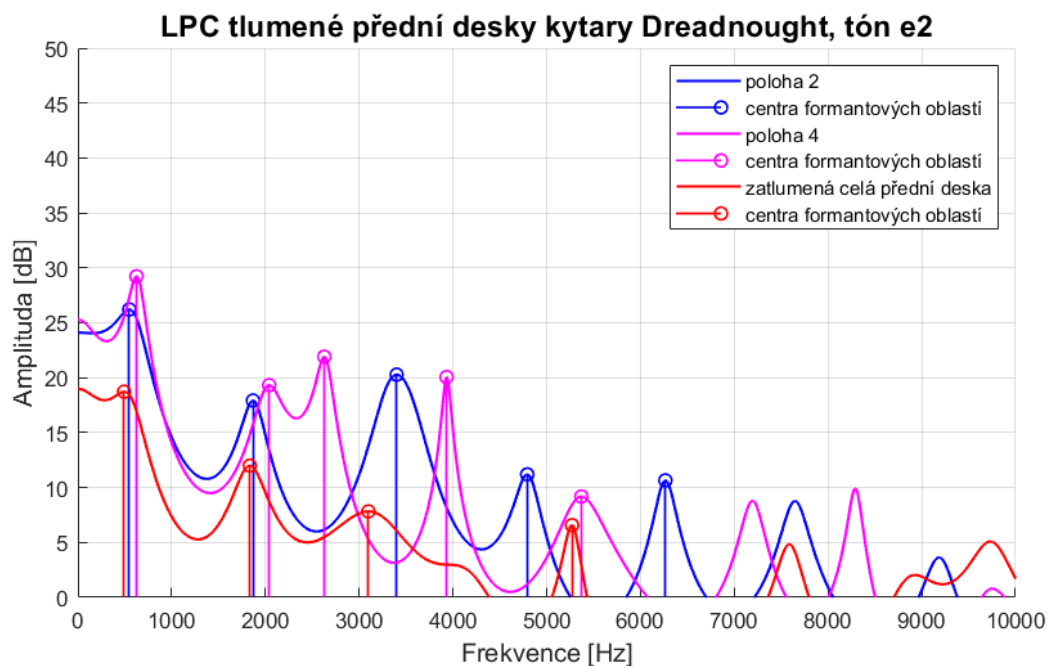
kromě místa č.2, které má opět úzké a výrazné formanty má podobný charakter i LPC při zatlumení místa č.4.



Obrázek 6.2:12 Rozdíl FFT spektra kytary Dreadnought při tlumení, tón e2

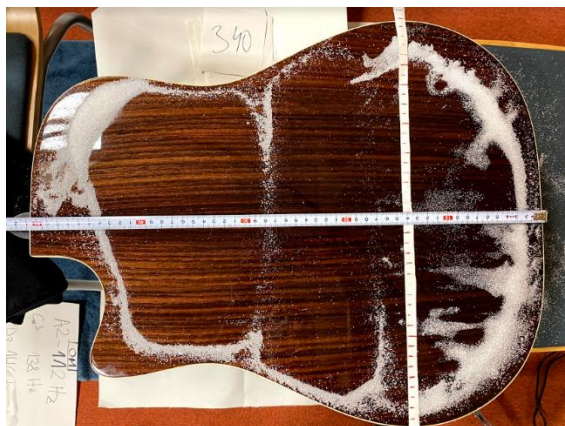


Obrázek 6.2:13 Porovnání LPC při tlumení jednotlivých míst kytary Dreadnought, tón e2



Obrázek 6.2:14 Porovnání LPC při lokálním tlumení přední desky kytary Dreadnought, tón e2

Na zadní desce se v tomto případě uzlové čáry hromadí jak po obvodu, tak i uprostřed desky. V těchto místech můžeme očekávat žebroví.



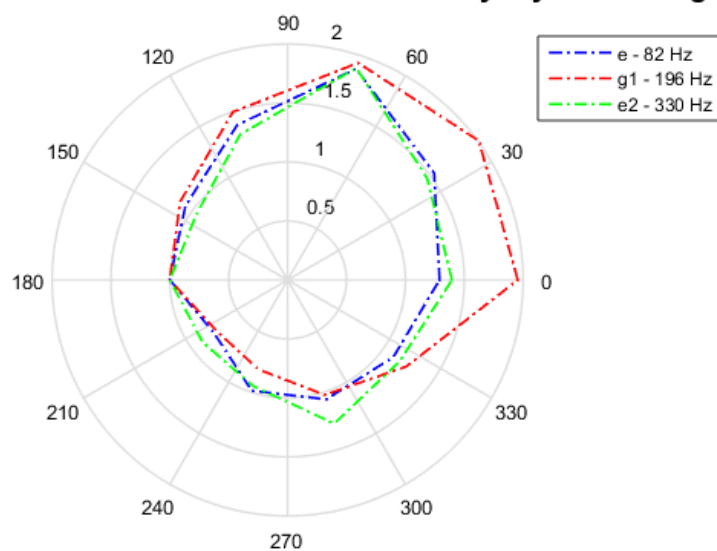
Obrázek 6.2:15 Mód na zadní desce kytary Dreadnought při $f=340$ Hz



Obrázek 6.2:16 Mód na zadní desce kytary Dreadnought při $f=420$ Hz

U kytary Dreadnought se rozdíl ve směrovosti příliš neprojevil. Na straně skříně mikrofony zaznamenaly slabší signál než na straně opačné, ale podobně se kytara chovala i při nezatlumených částech.

Směrová vyzařovací charakteristika tlumené kytary dreadnought



Obrázek 6.2:17 Směrovost tlumené kytary Dreadnought

7 ZHODNOCENÍ

V následující kapitole je stručné shrnutí vlastností jednotlivých kytar. Kytary jsou v mnohém rozdílné. Největší podobnost najdeme ve směrovosti. Zvláště ve vyšší dynamice mají kytary téměř stejné vyzařovací schopnosti. Nedochozí k tvorbě laloků, některé tóny nevyzařují symetricky – zaznamenáváme je spíše po levici hráče.

7.1 Referenční kytara

Frekvenční spektrum referenční kytary je bohaté na vyšší harmonické složky. První dvě složky bývají vždy výrazné, tóny mají dobrou nosnost a jsou mohutné. Formantové oblasti se více projevují při vyšších kmitočtech. Mód přední desky hledáme na nižších kmitočtech do cca 500 Hz. Zadní deska hraje největší roli na kmitočtech od 1,6 kHz do 4,2 kHz. Objem skříně nám ovlivňuje spíše vyšší frekvence v důsledku menšího těla kytary. Směrovost kytary se mění s dynamikou – při nižší dynamice dochází k tvorbě zadních laloků zvláště na nižších frekvencích.

7.2 Kytara Dreadnought

Oproti ostatním kytarám postrádá na vyšších kmitočtech harmonické složky, tělo podporuje spíše nižší kmitočty. Je to dáno především jeho větším rozměrem. To má vliv také na formantové oblasti, kterých při nižších tónech je početně méně, čím jdeme s frekvencí výš, tím jich je méně. Formant se opakuje na frekvenci kolem 2,6 kHz, který nejvíce podporuje rezonance zadní desky. Hlavní mód přední desky bychom našli na frekvenci cca 200 Hz. Směrovost je vyrovnaná ve všech měřených dynamikách.

7.3 Linková kytara

Spektrum je podobné jako má kytara referenční. Nenajdeme u ní ovšem tolik formantových oblastí. Její barva je o něco „chudší“. Módy jsme u této kytary neměřili a můžeme předpokládat, že se budou nacházet na podobných místech jako u referenční kytary, především z důvodu stejného tvaru těla. Tóny kytary jsou průrazné a mají i dobrou nosnost, dlouho znějí. Směrovost má kytara při změně dynamiky vyrovnanou.

8 ZÁVĚR

V teoretické části jsem se věnovala především akustickým kytarám a popisu měřených veličin.

V praktická části byla popsána metodika měření směrovosti kytar, frekvenčního spektra a časových vlastností. Popsány byly časové vlastnosti ve více dynamikách, stejně tak vyzařovací charakteristiky nástrojů. Frekvenční spektra byla popsána, nechybělo porovnání prvních osmi harmonických složek. Zobrazena je také analýza formantových oblastí pomocí lineární predikce.

V poslední části práce se díky tlumení částí kytar mohla dát získaná data do souvislosti, a spolu s nalezenými Chladniho obrazci vyhodnotit některé módy kytar Dreadnought a referenční.

Akustické kytary jsou na první pohled jednoduchým nástrojem. Při hlubším ponoření se do tématu tomu tak není. Jsou to právě detaily, které utváří charakteristickou barvu jednotlivých kytar – kde se bude nacházet kobylka, z jakého materiálu bude krk, jaké jsou na kytarě struny... V této oblasti hudebních nástrojů bude neustále co zkoumat a inovovat.

Přestože je kytara tak oblíbeným nástrojem, nepodařilo se mi nalézt mnoho materiálů, které by se zajímaly jednotlivými módy a formantovými oblastmi kytar. Proto si myslím, že by stálo za to dané téma prozkoumat ještě více do hloubky.

9 LITERATURA

- [1] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, c2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [2] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [3] JÄGER, Ondřej. *Návrh konstrukce kytary na základě vlastních tvarů ozvučné desky*. Brno, 2006. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Koňas, Ph.D.
- [4] Akustická kytara – country, bluegrass – Kytara a její části. *Kytara.net* [online]. -: Martin, 2010 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://www.kytara.net/anatomie/kytara-a-jeji-casti>
- [5] Struny na kytaru – podrobný průvodce. *Nanastroj.cz* [online]. Praha: Jiří Kynčl, - [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://nanastroj.cz/struny-na-kytaru>
- [6] Model Furch Green SR: Modely kytar. *Furch Guitars* [online]. Furch guitars, c2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://furchguitars.com/cs/nastroje/green-series/green-sr/>
- [7] Jak ovlivňuje druh dřeva zvuk akustické kytary [online]. *frontman.cz*, 2017 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://frontman.cz/jak-ovlivnuje-druh-dreva-zvuk-akusticke-kytary>
- [8] SCHIMMEL, Jiří. *Speciální typy syntézy zvuku: Hudební elektronika*. Brno: prezentace k předmětu Hudební elektronika.
- [9] ROSSING, Thomas D., ed. *The Science of String Instruments*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-7109-8.
- [10] Figuras de Chladni. *Taringa.net* [online]. 2012 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.taringa.net/+info/figuras-de-chladni_tyek5
- [11] Planetary Waves and the Hovmöller Diagram. *MetService Blog* [online]. 2016 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://blog.metservice.com/Planetary-Waves-and-the-Hovm%C3%B6ller-Diagram>
- [12] Furch Guitars. Yellow Plus SP – Furch Guitars: Technické specifikace [online]. c2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z URL: [<https://furchguitars.com/cs/nastroje/yellow-series/yellow-plus-sp/>](https://furchguitars.com/cs/nastroje/yellow-series/yellow-plus-sp/).
- [13] JUHAŠČIK, Lukáš. *Analýza rezonančních skříní u různých typů akustických kytar* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125879>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

[14] HANZÁLEK, P. *Analýza spektra houslí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 77s. Vedoucí bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

[15] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *Matlab: Začínáme se signály*. Praha: Ben – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-200-0.

[16] HAVELOCK, David, Sonoko KUWANO a Michael VORLÄNDER, ed. *Handbook of Signal Processing in Acoustics: Volume 1*. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-77698-9.

SEZNAM VELIČIN A ZKRATEK

FFT	Fast Fourier Transform – Rychlá Fourierova transformace
LPC	Linear predictive Coding – Lineární prediktivní kódování
L	hladina akustického tlaku
f	frekvence
Dc	tvár těla kytary Dreadnought s výřezem
OM	orchestra model

SEZNAM PŘÍLOH

A. Obsah přiloženého CD

A. OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na CD jsou nahrány vzorky ze spektrálního mikrofonu uspořádané do složek pro každou kytaru zvlášť.